

Departamento de Ingeniería Mecánica

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE LA SUSPENSIÓN SECUNDARIA DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

AUTOR: JUAN FERNÁNDEZ SANTAMARÍA

TUTOR: HIGINIO RUBIO ALONSO

LEGANÉS, JULIO DE 2018

Título: ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE LA SUSPENSIÓN SECUNDARIA DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO.

Autor: JUAN FERNÁNDEZ SANTAMARÍA

Tutor: HIGINIO RUBIO ALONSO

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo de Fin de Grado el día ____ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle una CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, especialmente a mis padres, por su apoyo y el empeño que han puesto en guiarme siempre hacia el camino correcto, por su total confianza en mí y por el esfuerzo que han hecho al darme la libertad para elegir mi futuro.

A mis amigos, los que estaban lejos y los que he conocido en estos cuatro años, que me han apoyado y han estado ahí siempre en lo bueno y en lo malo.

Por último, a mis tutores, Higinio Rubio Alonso y Alejandro Bustos Caballero, por su dedicación y tiempo empleado en ayudarme sacar este proyecto adelante.

RESUMEN

Este proyecto de fin de grado consiste en analizar y estudiar el comportamiento de la suspensión secundaria de un vehículo ferroviario durante su paso por un trazado curvo, por medio de un software de simulación.

Antes de proceder a la realización de los experimentos, se presentan algunos conceptos teóricos fundamentales, los cuales son importantes para una buena comprensión del tema principal del proyecto.

A continuación, se describe la herramienta con la que se va a trabajar, “*Universal Mechanism*”, un software con un gran potencial que permite realizar simulaciones y obtener información detallada de los parámetros de un vehículo ferroviario. En el presente proyecto, se analiza la suspensión secundaria del modelo de vehículo de pasajeros de “Manchester benchmark”, un modelo totalmente parametrizado que va a permitir realizar el estudio del comportamiento dinámico del vehículo.

En cuanto a las partes de la investigación, se va a hacer circular al modelo por curvas de diferente amplitud a diferentes velocidades. El estudio se divide en tres experimentos, en los que se modifica un parámetro del modelo y se analiza su comportamiento.

En el primer experimento se hace pasar el vehículo por diferentes curvas a diferentes velocidades hasta su descarrilamiento.

Seguidamente, en el segundo experimento se modifican las constantes de rigidez y de amortiguamiento del modelo y se le circular por curvas de diferente radio a una velocidad genérica establecida.

Para el tercer experimento se ha modificado la posición del centro de masas de la caja del vehículo en tres direcciones diferentes.

Una vez realizadas las simulaciones de todos los experimentos, se han procesado e interpretado los resultados proporcionados por el programa de simulación. A partir de esta información se han elaborado tablas y gráficos por medio de la herramienta MS-Excel para cada experimento, lo que ha permitido seguir la evolución del comportamiento de los amortiguadores según la velocidad de circulación o la amplitud de la curva. Finalmente, se han extraído conclusiones y propuesto trabajos futuros que continúan con el estudio y análisis de la suspensión de un vehículo ferroviario.

Palabras clave: Suspensión secundaria, Universal Mechanism, Manchester benchmark, simulación.

ABSTRACT

This final project consists of analyzing and studying the behavior of the secondary suspension of a railway vehicle when it goes through a curved path, by means of simulation software.

Before proceeding to the realization of the experiments, some fundamental theoretical concepts are presented, which are important for a good understanding of the main theme of the project.

Next, the tool with which we will work is described, "Universal Mechanism", a software with great potential that will allow us to simulate all the parameters of a railway vehicle. For the present project, we will analyze the secondary suspension of the passenger vehicle model of "Manchester benchmark", a fully parameterized model that will allow us to carry out the study of the dynamic behavior of the vehicle.

As for the parts of the investigation, the model will go through curves of different amplitude at different speeds. The study is divided into three experiments, in which a parameter of the model is modified and its behavior is analyzed.

In the first experiment, the vehicle goes through different curves at different speeds until it derails.

Next, in the second experiment, the stiffness and damping constants of the model are modified and it will go through curves of different radius at an established generic speed.

For the third experiment, the position of the center of mass of the vehicle box is modified in three different directions.

Once the simulations of all the experiments have been carried out, the graphics provided by the simulation program are processed and interpreted. From this information, tables and graphs are prepared in Excel for each experiment, which allow us to follow the evolution of the behavior of the dampers according to the speed of circulation or the amplitude of the curve. Finally, conclusions have been drawn and proposed future work that continues with the study and analysis of the suspension of a railway vehicle.

Keywords: Secondary suspension, Universal Mechanism, Manchester benchmark, simulation.

Índice de contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ÁMBITIO Y MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	4
1.3	ETAPAS DEL PROYECTO	6
1.4	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	8
2	COMPLEMENTOS TEÓRICOS	9
2.1	EL FERROCARRIL Y SUS CARACTERÍSTICAS	9
2.2	CLASIFICACIÓN DE LOS FERROCARRILES	12
2.3	LA VÍA COMO ESTRUCTURA	13
2.3.1	ANCHO DE VIA	14
2.3.2	INFRAESTRUCTURA	14
2.3.3	SUPERESTRUCTURA	16
2.4	MATERIAL RODANTE	24
2.4.1	EL BOGIE	25
2.5	SISTEMA DE SUSPENSIÓN	37
2.5.1	DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS	37
2.5.2	ELEMENTOS DE LA SUSPENSIÓN	37
2.6	VISCOELASTICIDAD	43
2.6.1	DEFINICIÓN DE VISCOELASTICIDAD	43
2.6.2	MODELOS BÁSICOS DE VISCOELASTICIDAD	44
2.6.3	AMORTIGUADORES VISCOELÁSTICOS	46
3	DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA	48
3.1	INTRODUCCIÓN A “UNIVERSAL MECHANISM”	48
3.2	ESTRUCTURA DEL PROGRAMA	50
3.2.1	UM INPUT	50
3.2.2	UM SIMULATOR	52
3.3	LISTA DE MÓDULOS DE UM	56
4	METODOLOGÍA	58
4.1	ANTECEDENTES	58
4.1.1	PROBLEMA EN EL DISEÑO DE LA SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO FERROVIARIO	58

4.1.2	EL SOFTWARE: “UNIVERSAL MECHANISM”	59
4.2	PLANIFICACIÓN.....	60
4.3	NORMATIVA APLICABLE	64
4.4	RESULTADOS ESPERADOS	67
5	DESARROLLO DEL PROYECTO Y RESULTADOS.....	68
5.1	GEOMETRÍA DE LA VÍA	68
5.2	MODELO DEL VEHÍCULO DE TRABAJO	73
5.3	PARÁMETROS SELECCIONADOS Y PROCESO DE ANÁLISIS	79
5.4	EXPERIMENTO 1	83
5.4.1	CURVA 1KM	84
5.4.2	CURVA 2KM	88
5.4.3	CURVA 5KM	91
5.4.4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 1.....	95
5.5	EXPERIMENTO 2	100
5.5.1	CURVA 1KM	103
5.5.2	CURVA 2KM	106
5.5.3	CURVA 5KM	109
5.5.4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 2.....	112
5.6	EXPERIMENTO 3	115
5.6.1	CURVA 1KM	119
5.6.2	CURVA 2KM	124
5.6.3	CURVA 5KM	129
5.6.4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 3.....	134
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	145
6.1	CONCLUSIONES	145
6.2	TRABAJOS FUTUROS.....	149
7	PRESUPUESTO	150
8	BIBLIOGRAFÍA.....	154
	ANEXOS	158

Índice de figuras

Figura 1.1: Ferrocarril Barcelona-Mataró [2]	1
Figura 1.2: Reparto modal del transporte de mercancías y pasajeros [3]	2
Figura 1.3: Estructura del proyecto.....	6
Figura 1.4: Diagrama de Gantt del proyecto.....	7
Figura 2.1: Consumo de energía (KEP*/100 personas-km) en cada medio de transporte en España (2012) *KEP=Kilogramos equivalentes de petróleo. [7].....	9
Figura 2.2: El tren italiano ElettroTreno ETR 200 fue el primer servicio comercial de tren de alta velocidad en 1939. Llegando a alcanzar los 203km/h de velocidad media. [8].....	10
Figura 2.3: Riesgo de muerte para los diferentes medios de transporte de la Unión Europea en el periodo 2001/2002. [9]	11
Figura 2.4: Composición de la superestructura de la vía	13
Figura 2.5: Clotoide.	15
Figura 2.6: Perfiles transversales	16
Figura 2.7: Partes del carril (Forma Vignole).....	17
Figura 2.8: Tipos de traviesa según su forma. [3]	18
Figura 2.9: Sujeción "Vossloh" de clip.....	20
Figura 2.10: Vía en placa de hormigón en Alemania. [13]	23
Figura 2.11: Bogie [3]	25
Figura 2.12: a) Bogies no articulados, b) Bogies articulados [14]	26
Figura 2.13: Bastidor.	27
Figura 2.14: Rueda con llanta y sus partes. [3]	28
Figura 2.15: Conicidad de llantas	29
Figura 2.16: Caja de grasa.	30
Figura 2.17: Transmisión.	31
Figura 2.18: Disco de freno.	34
Figura 2.19: Suspensión primaria.....	35
Figura 2.20: Modelo dinámico del conjunto tren-vía [3]	36
Figura 2.21: Muelle helicoidal.	39
Figura 2.22: Ballesta	39

Figura 2.23: Brazo de torsión	40
Figura 2.24: Resorte caucho-metal	41
Figura 2.25: Amortiguador de doble tubo.	42
Figura 2.26: Representación esquemática de un a) sólido rígido-resorte y b) fluido viscoso-émbolo	44
Figura 2.27: Representación esquemática del modelo viscoelástico de Maxwell.....	45
Figura 2.28: Representación del modelo viscoelástico empleado por el software UM.	46
Figura 2.29: Modelo de trabajo (Maxwell) de UM.....	47
Figura 3.1: Logo de Universal Mechanism [21].....	48
Figura 3.2: Ventana principal de UM Input.....	50
Figura 3.3: Ventana principal de UM Simulator.....	53
Figura 3.4: Ventana "Wizard of variables"	53
Figura 3.5: Categoría "Bipolar Forces"	54
Figura 3.6: Ventana de simulación.....	55
Figura 3.7: Fin de simulación en UM Simulator	55
Figura 4.1: Diagrama de bloques del proyecto	63
Figura 5.1: Macrogeometría de una curva en S. [38].....	69
Figura 5.2: Parámetros para una curva de 2km de radio.....	70
Figura 5.3: Expresiones para establecer los parámetros de la curva.....	71
Figura 5.4: Geometría de la curva de 90°. [14]	72
Figura 5.5: Modelo 'Passenger Car ExtR' de Universal Mechanism.	73
Figura 5.6: Esquema de componentes de 'Passenger Car ExtR'. [41]	74
Figura 5.7: Vista completa del bogie.....	74
Figura 5.8: Componentes suspensión primaria.....	77
Figura 5.9: Componentes suspensión secundaria.....	78
Figura 5.10: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=45\text{m/s}$	80
Figura 5.11: Partes de la gráfica.	81
Figura 5.12: Fuerza que ejerce el amortiguador sobre el bogie (gráfica de muestra).....	82
Figura 5.13: Geometría de la curva.	83
Figura 5.14: Puntos de extracción de los datos para experimento 1.....	84

Figura 5.15: Variación de longitud VS Velocidad en curva $R=1\text{km}$ (Experimento 1).....	86
Figura 5.16: Variación de longitud VS Velocidad en curva $R=2\text{km}$ (Experimento 1).....	89
Figura 5.17: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=80\text{m/s}$	92
Figura 5.18: Variación de longitud VS Velocidad en curva $R=5\text{km}$ (Experimento 1).....	94
Figura 5.19: Relación entre velocidad máxima y radio de la curva del experimento 1.	96
Figura 5.20: Vehículo circulando por curva peraltada, con suspensión en dos etapas. [3]	97
Figura 5.21: Comparación de la variación de longitud en experimento 1.	98
Figura 5.22: Comparación comportamiento estable (inferior) y con vibraciones (superior).	99
Figura 5.23: Variación de longitud VS Modificación a una velocidad de 40 m/s en una curva de $R=1\text{km}$ (Experimento 2).....	104
Figura 5.24: Variación de longitud VS Modificación a una velocidad de 40 m/s en una curva de $R=2\text{km}$ (Experimento 2).....	107
Figura 5.25: Variación de longitud VS Modificación a una velocidad de 40 m/s en una curva de $R=5\text{km}$ (Experimento 2).....	110
Figura 5.26: Comparación de la variación de longitud en experimento 2.	113
Figura 5.27: Comparación de la velocidad máxima en experimento 2.	114
Figura 5.28: Puntos de extracción de los datos para desplazamiento en eje Z en experimento 3.	117
Figura 5.29: Puntos de extracción de los datos para desplazamiento en eje Y en experimento 3.	118
Figura 5.30: Puntos de extracción de los datos para desplazamiento en eje X en experimento 3.	118
Figura 5.31: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Z en curva de 1km (Experimento 3).	122
Figura 5.32: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Y en curva de 1km (Experimento 3).	122
Figura 5.33: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje X en curva de 1km (Experimento 3).	123
Figura 5.34: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Z en curva de 2km (Experimento 3).	127
Figura 5.35: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Y en curva de 2km (Experimento 3).	127
Figura 5.36: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje X en curva de 2km (Experimento 3).	128

Figura 5.37: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Z en curva de 5km (Experimento 3).	132
Figura 5.38: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Y en curva de 5km (Experimento 3).	132
Figura 5.39: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje X en curva de 5km (Experimento 3).	133
Figura 5.40: Fuerzas que actúan en curva sobre el CM a lo largo de la dirección Z (Vista posterior del vehículo).	135
Figura 5.41: Comparación de Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Z (Experimento 3).	136
Figura 5.42: Comparación de las velocidades máximas (Dirección Z).	136
Figura 5.43: Fuerzas que actúan en curva sobre el CM a lo largo de la dirección Y (Vista posterior del vehículo).	138
Figura 5.44: Comparación de Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Y (Experimento 3).	139
Figura 5.45: Comparación de las velocidades máximas (Dirección Y).	140
Figura 5.46: Fuerzas que actúan en curva sobre el CM a lo largo de la dirección X. Desplazamiento hacia la parte delantera (inferior) y hacia la parte trasera (superior). (Vista desde interior de la curva).....	142
Figura 5.47: Comparación de las velocidades máximas (Dirección X).	143

Índice de tablas

Tabla 5.1: Parámetros raíl R65. [39].....	71
Tabla 5.2: Parámetros traviesa.	72
Tabla 5.3: Masas de los componentes del vehículo.....	75
Tabla 5.4: Componentes suspensión primaria y secundaria del modelo. [41]	75
Tabla 5.5: Nomenclatura suspensión primaria.	76
Tabla 5.6: Nomenclatura suspensión secundaria.	77
Tabla 5.7: Dimensiones principales del modelo. [40]	78
Tabla 5.8: Leyenda de las gráficas.	80
Tabla 5.9: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del experimento 1.....	83
Tabla 5.10: Resultados curva R=1km (Experimento 1).	85
Tabla 5.11: Variación de longitud en curva de R=1km (Experimento 1).....	86
Tabla 5.12: Resultados curva R=2km (Experimento 1).	88
Tabla 5.13: Variación de longitud en curva de R=2km (Experimento 1).....	89
Tabla 5.14: Resultados curva R=5km (Experimento 1).	91
Tabla 5.15: Variación de longitud en curva de R=5km (Experimento 1).....	93
Tabla 5.16: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del experimento 2... 100	
Tabla 5.17: Valores predeterminados de las constantes de rigidez y amortiguación.	101
Tabla 5.18: Modificación de los valores en experimento 2 (parte 1).	101
Tabla 5.19: Modificación de los valores en experimento 2 (parte 2).	102
Tabla 5.20: Resultados para la curva R=1km a una velocidad de 40 m/s (velocidad genérica).....	103
Tabla 5.21: Variación de longitud en curva de R=1km (Experimento 2).....	104
Tabla 5.22: Velocidades críticas para curva R=1km (Experimento 2).	105
Tabla 5.23: Resultados para la curva R=2km a una velocidad de 40 m/s (velocidad genérica).....	106
Tabla 5.24: Variación de longitud en curva de R=2km (Experimento 2).....	107
Tabla 5.25: Velocidades críticas para curva R=2km (Experimento 2).	108
Tabla 5.26: Resultados para la curva R=5km a una velocidad de 40 m/s (velocidad genérica).....	109
Tabla 5.27: Variación de longitud en curva de R=5km (Experimento 2).....	109
Tabla 5.28: Velocidades críticas para curva R=5km (Experimento 2).	111

Tabla 5.29: Tablas, en metros, de los incrementos en cada eje (Experimento 3).	115
Tabla 5.30: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del eje X del experimento 3.	116
Tabla 5.31: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del eje Y del experimento 3.	116
Tabla 5.32: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del eje Z del experimento 3.	117
Tabla 5.33: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Z, curva 1km (Experimento 3).	119
Tabla 5.34: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Y, curva 1km (Experimento 3).	119
Tabla 5.35: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en X, curva 1km (Experimento 3).	120
Tabla 5.36: Variación de longitud en el eje Z en curva de R=1km (Experimento 3).	121
Tabla 5.37: Variación de longitud en el eje Y en curva de R=1km (Experimento 3).	121
Tabla 5.38: Variación de longitud en el eje X en curva de R=1km (Experimento 3).	121
Tabla 5.39: Velocidades críticas para curva R=1km (Experimento 3).	124
Tabla 5.40: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Z, curva 2km (Experimento 3).	124
Tabla 5.41: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Y, curva 2km (Experimento 3).	125
Tabla 5.42: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en X, curva 2km (Experimento 3).	125
Tabla 5.43: Variación de longitud en el eje Z en curva de R=2km (Experimento 3).	126
Tabla 5.44: Variación de longitud en el eje Y en curva de R=2km (Experimento 3).	126
Tabla 5.45: Variación de longitud en el eje X en curva de R=2km (Experimento 3).	126
Tabla 5.46: Velocidades críticas para curva R=2km (Experimento 3).	129
Tabla 5.47: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Z, curva 5km (Experimento 3).	129
Tabla 5.48: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Y, curva 5km (Experimento 3).	130
Tabla 5.49: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en X, curva 5km (Experimento 3).	130

Tabla 5.50: Variación de longitud en el eje Z en curva de R=5km (Experimento 3).	131
Tabla 5.51: Variación de longitud en el eje Y en curva de R=5km (Experimento 3).	131
Tabla 5.52: Variación de longitud en el eje X en curva de R=5km (Experimento 3).	131
Tabla 5.53: Velocidades críticas para curva R=5km (Experimento 3).	134
Tabla 7.1: Resumen de los gastos de personal.	151
Tabla 7.2: Desglose de los costes del proyecto.....	152
Tabla 7.3: Gráfico de costes.	153

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ÁMBITO Y MOTIVACIÓN

El ferrocarril es un medio de transporte terrestre que se usa tanto para el transporte de personas como mercancías. Generalmente, consiste en una locomotora que arrastra un conjunto de coches, si se trata de personas, o de vagones, para mercancías, que circulan sobre una vía férrea. Este medio de transporte posee numerosas ventajas con respecto a otros. Algunas de estas ventajas más relevantes son: el bajo consumo de combustible en relación a la carga transportada, el bajo impacto ambiental y la posibilidad de mover cantidades masivas de carga. Estas características colocan al ferrocarril como uno de los medios de transporte más relevantes hoy en día, gracias a que, recientemente, ha experimentado un gran desarrollo.

Durante los últimos 25 años, España se ha convertido en el segundo país del mundo, por detrás de China, con mayor número de kilómetros de vía de alta velocidad. Esto se debe al importante desarrollo de la industria en nuestro país y, en particular, del sector ferroviario. Exactamente, España cuenta con 3248 kilómetros de redes de alta velocidad.

En la actualidad, nuestro país, se sitúa entre uno de los 15 primeros países en materia de infraestructuras ferroviarias. Tal ha sido su desarrollo en este sector, que una gran cantidad de empresas ferroviarias españolas están participando en más de 50 proyectos en casi una centena de países de todo el mundo. [1]



Figura 1.1: Ferrocarril Barcelona-Mataró [2]

La historia del ferrocarril comienza cuando a finales de siglo XVIII, en las minas inglesas se empezó a usar un sistema de carriles de madera para transportar el mineral, que posteriormente serían de acero y hierro. Este sistema no tuvo mucho éxito al principio debido a la poca adherencia desarrollada por los vehículos que circulaban sobre los raíles.

Es más tarde, en 1830 cuando comenzó la era del ferrocarril, que coincide con la inauguración de la línea *Stockton-Darlington* (18 kilómetros), utilizando una locomotora diseñada por *Stephenson*, conocido como 'el padre del ferrocarril'. A continuación, el 15 de septiembre de ese mismo año, se creó la línea *Liverpool-Manchester*, y de aquí en adelante se extendió por toda Europa y Estados Unidos.

Sin embargo, la situación en España en el año 1840, era muy diferente a la europea, en la que ferrocarril sufrió un enorme desarrollo. Las infraestructuras viarias y portuarias no habían cambiado desde el siglo anterior y el principal medio de transporte terrestre eran las diligencias.

Esto no significaba que se hubiera producido algunos intentos para implantar el ferrocarril en nuestro país. Tras algunos de estos fallidos, se construyó la primera línea de ferrocarril en la península en 1843, de Barcelona a Mataró (figura 1.1), un trayecto de 28 kilómetros. Sin embargo, la primera línea de ferrocarril en territorio español fue en Cuba en 1837, y unió La Habana y Güines (78 kilómetros).

A pesar del gran avance en el sector ferroviario en España, la situación del ferrocarril en Europa revela que ha ido empeorando y perdiendo protagonismo en estos últimos años. Sin embargo, el transporte por carretera es el predominante tanto para el transporte mercancías como para pasajeros.

Los datos muestran que el transporte de mercancía y pasajeros se va inclinando hacia la carretera, saliendo perjudicado principalmente el transporte por ferrocarril. Esto es debido a que las nuevas formas de organización de la producción encuentran en estos momentos a la carretera como el método más conveniente para el transporte.

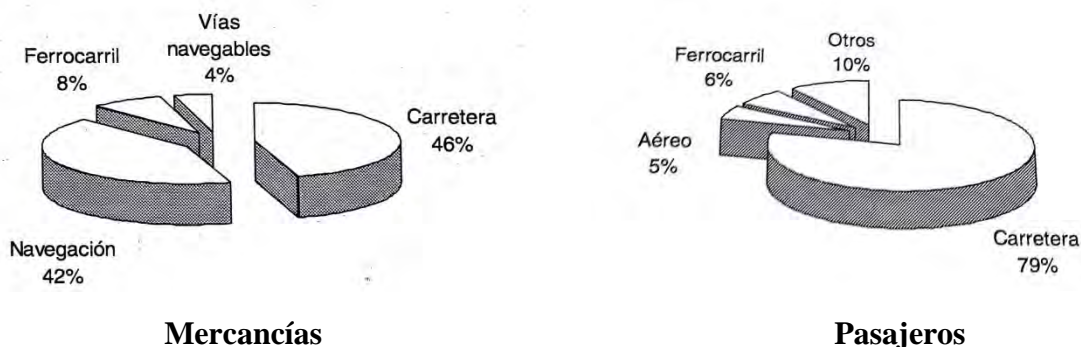


Figura 1.2: Reparto modal del transporte de mercancías y pasajeros [3]

Sin embargo, la Unión Europea pretende reducir los tres principales problemas del transporte, que son la congestión en las vías de circulación, los accidentes de circulación y la contaminación ambiental. Pues bien, si se analizan todos los medios de transporte en función de estos tres factores, el ferrocarril saldría el que mejor parado y la Unión Europea es consciente de ello. Por tanto, se está intentando lanzar nuevas iniciativas para hacer al ferrocarril un medio de transporte más competitivo. Para ello, ya se aprobaron en 2001 tres directivas para la apertura de más de 50.000 kilómetros de vías y continúan lanzando nuevos “paquetes ferroviarios” para mejorar la política de transporte, el refuerzo de la seguridad y la apertura del mercado de transporte ferroviario de mercancías entre otras muchas mejoras. De esta forma, se pretende crear un sistema de transporte ferroviario de mercancías capaz de competir con el transporte por carretera.

Nuestro país, juega un papel fundamental en este proyecto desarrollado por la Unión Europea. Y como país líder en el sector, España ha aprobado una serie de directivas que apoyan la interoperabilidad en espacio europeo con el fin de fomentar el desarrollo de una infraestructura ferroviaria eficaz y la creación de un mercado ferroviario abierto para poder competir con los demás modos de transporte. [4]

En las dos últimas décadas, el ferrocarril ha experimentado un importante desarrollo, gracias en gran parte a las nuevas tecnologías y al apoyo recibido por parte de multitud de países que han apostado por el ferrocarril como medio de transporte. Tal ha sido el avance, que aún se siguen introduciendo innovaciones y mejoras para hacer del ferrocarril un modo de transporte competitivo. Actualmente, existen ferrocarriles de alta velocidad e incluso trenes de levitación magnética. Se trata de un medio de transporte muy completo y con un futuro prometedor del que se debería sacar partido. Todo esto, entre otras cosas, ha hecho que despierte mi interés en este sistema de transporte, y me ha servido como motivación para escoger este tema como proyecto, que está centrado en el estudio de los parámetros críticos del sistema de suspensión secundaria por medio de un programa de simulación.

1.2 OBJETIVOS

El presente proyecto tiene como objetivo principal estudiar los valores críticos de confort y seguridad de un vehículo ferroviario mediante la simulación y el análisis de ciertos parámetros mecánicos. Concretamente, se estudiará la evolución del sistema de suspensión ferroviario, observando la elongación y compresión de la suspensión secundaria para diferentes configuraciones: curvas de diferente radio, velocidades de circulación o centros de masa del coche.

Para lograr el objetivo principal, se cumplirán los siguiente pasos u objetivos secundarios:

- Se efectuará un informe de un estudio que contenga la información actualizada relacionada con los sistemas ferroviarios y, en particular, la suspensión ferroviaria, incluyendo conceptos fundamentales sobre la estructura de la vía y el sistema de suspensión completo de un vehículo ferroviario.
- Se estudiará la viabilidad del software de simulación ferroviario “*Universal Mechanism*” como herramienta para llevar a cabo el objetivo principal. Para ello, se analizará la estructura del programa, así como los módulos que lo componen y la capacidad de éstos para dar una solución adecuada a este estudio.
- Para efectuar el estudio de este trabajo se utilizará un modelo de coche de pasajeros estándar. Si es factible, se particularizará un modelo extraído de la librería del software “*Universal Mechanism*”. Si no sirviera ningún modelo de la base de datos del programa se realizará un modelo de coche de viajeros estándar usando las herramientas propias del programa.
- Se establecerán las características variables del sistema, así como los parámetros críticos y de interés que vamos a analizar. En este punto se definirán aspectos tales como el rango de velocidades, los radios de curva, los coeficientes de rigidez de la suspensión o los desplazamientos del centro de masas, así como estudiar qué parámetros de seguimiento serían adecuados y sería posible ver su evolución.
- Se planificarán una serie de experimentos o simulaciones con el modelo de coche de pasajeros, definido anteriormente, variando ciertas características operativas o estructurales del sistema ferroviario.
- Se obtendrán, para cada experimento planificado, los resultados de la evolución de parámetros de seguimiento, tabulando y obteniendo gráficas de los mismos.

- Se procesarán e interpretarán los resultados obtenidos, comparando sus evoluciones y discutiendo los posibles orígenes causales para obtener unas conclusiones completas y fundamentadas.
- También se realizará una estimación del presupuesto de los costes que arrojaría abordar este proyecto.
- Finalmente, se pretende crear un anexo lo suficientemente completo, en extensión y definición, para poder continuar con este estudio o como modelo de conjunto de datos de otros parámetros relacionados para usar en proyectos futuros.

Para llevar los objetivos a cabo, se ha seleccionado de la librería del programa de simulación un modelo de vehículo ferroviario de pasajeros estándar. Con el módulo de pre-procesado del programa se realizarán las modificaciones convenientes en el modelo. Más tarde, se realizarán las simulaciones de los experimentos planteados utilizando el módulo de simulación. Y, finalmente, se procesarán e interpretarán los resultados obtenidos del programa de simulación por medio de la herramienta MS-Excel.

1.3 ETAPAS DEL PROYECTO

Para definir las etapas del proyecto, se ha realizado un diagrama de Gantt, una forma de exponer el tiempo dedicado a las diferentes tareas o actividades a lo largo del proceso de realización del proyecto. A continuación, se muestra dicho diagrama, que nos proporcionará una idea general de cómo se ha distribuido el tiempo.

Id	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1	Proyecto Fin de Grado	12 sem.	lun 12/03/18	vie 22/06/18	
2	Inicio del proyecto	0 sem.	lun 12/03/18	lun 12/03/18	
3	Fase 1. Planteamiento y elección del proyecto	1.5 sem.	lun 12/03/18	vie 23/03/18	
4	Análisis y selección de alternativas	0.5 sem.	lun 12/03/18	jue 15/03/18	
5	Definición del proyecto, objetivos y alcance	0.5 sem.	jue 15/03/18	mar 20/03/18	4
6	Establecer los parámetros a realizar	1 sem.	jue 15/03/18	vie 23/03/18	4
7	Fase 2. Documentación y primera toma de contacto con el software	2.5 sem.	vie 23/03/18	vie 13/04/18	
8	Investigación y recopilación de información	2.5 sem.	vie 23/03/18	vie 13/04/18	6
9	Familiarización con el entorno del programa	2 sem.	vie 23/03/18	mar 10/04/18	6
10	Fase 3. Estudio en profundidad de la información elegida	1.5 sem.	lun 16/04/18	vie 27/04/18	
11	Discriminación de la información	0.5 sem.	lun 16/04/18	jue 19/04/18	8,9
12	Estudio en detalles de la información seleccionada	1 sem.	jue 19/04/18	vie 27/04/18	11
13	Fase 4. Definición de los experimentos	1.5 sem.	vie 23/03/18	jue 05/04/18	
14	Estudio de los parámetros seleccionados en los diferentes escenarios	1 sem.	vie 23/03/18	lun 02/04/18	6
15	Formulación de los experimentos	0.5 sem.	lun 02/04/18	jue 05/04/18	14
16	Fase 5. Simulación y obtención de resultados	1.5 sem.	mar 10/04/18	mar 24/04/18	
17	Modificación de las variables de los modelos predeterminados	0.5 sem.	mar 10/04/18	vie 13/04/18	9;15
18	Creación de los proyectos en el software	0.5 sem.	lun 16/04/18	jue 19/04/18	17
19	Obtención de los resultados	0.5 sem.	jue 19/04/18	mar 24/04/18	18
20	Fase 6. Procesado e interpretación de los resultados	1 sem.	mar 24/04/18	mié 02/05/18	
21	Análisis de los resultados obtenidos	0.5 sem.	mar 24/04/18	vie 27/04/18	19
22	Elaboración de tablas Excel	0.5 sem.	vie 27/04/18	mié 02/05/18	21
23	Fase 7. Redacción de la memoria y de la presentación	6 sem.	mié 02/05/18	vie 22/06/18	
24	Organización de la información y los resultados	0.2 sem.	mié 02/05/18	jue 03/05/18	22
25	Realización de la memoria	4 sem.	jue 03/05/18	jue 07/06/18	12;24
26	Revisión de fallos	0.3 sem.	jue 07/06/18	lun 11/06/18	25
27	Elaboración de la presentación	1.5 sem.	lun 11/06/18	vie 22/06/18	26
28	Final del proyecto	0 sem.	vie 22/06/18	vie 22/06/18	27

Figura 1.3: Estructura del proyecto

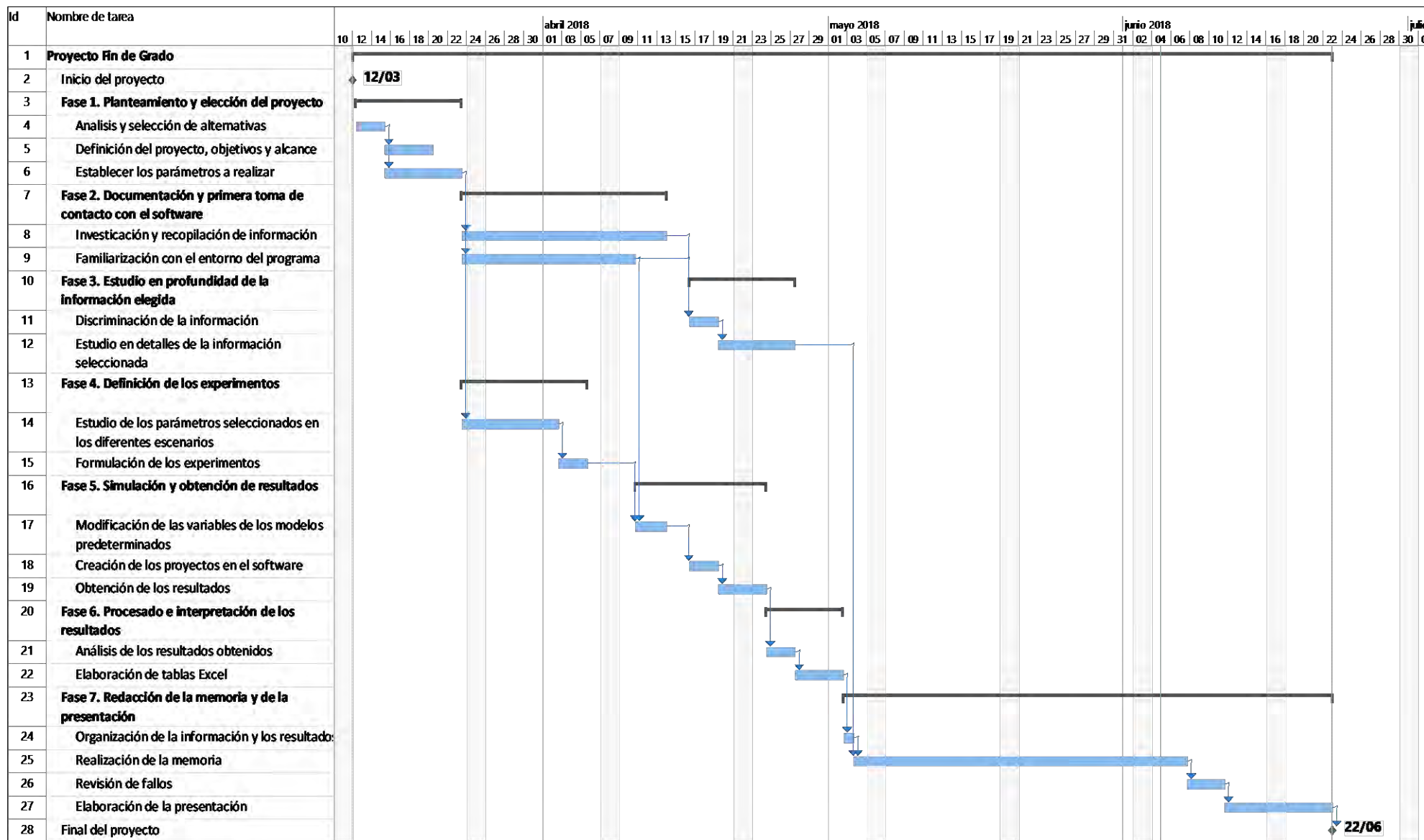


Figura 1.4: Diagrama de Gantt del proyecto

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

El proyecto se va a dividir en ocho capítulos y tres anexos. A continuación, se muestra una breve explicación del contenido de cada parte.

- En el capítulo 1, “Introducción”, se recoge la información relacionada con el ámbito y la motivación del proyecto. Además, se exponen los objetivos y metas establecidos, así como una breve descripción de la estructura de la memoria.
- En el capítulo 2, “Complementos teóricos”, se van a describir los conceptos teóricos necesarios con el fin de ayudar a la comprensión del proyecto.
- En el capítulo 3, “Descripción de la herramienta”, se presenta el software con el que hemos realizado las simulaciones de este proyecto: *“Universal Mechanism”*. Además, se introducirá la estructura de éste, así como las opciones y herramientas que nos ofrece y los módulos en los que se divide.
- En el capítulo 4, “Metodología”, se presenta el método y la estructura seguida para la realización del proyecto.
- En el capítulo 5, “Desarrollo del proyecto y resultados”, se realizan las simulaciones correspondientes para cada experimento y se analizarán y discutirán los resultados obtenidos.
- En el capítulo 6, “Presupuesto”, se realiza una estimación de los costes que supondría la realización de un proyecto similar a este.
- En el capítulo 7, “Conclusiones y trabajos futuros”, se exponen las conclusiones obtenidas de los experimentos y se propondrán posibles trabajos futuros para continuar con el estudio de los parámetros con los que se ha trabajado.
- En el capítulo 8, “Bibliografía”, se recogen todas las referencias bibliográficas que han servido de apoyo para completar el proyecto.

Por último, se incluirán tres anexos, que se corresponden a los tres experimentos que se van a llevar a cabo en el proyecto. Éstos, recogen todas las gráficas obtenidas de las distintas simulaciones realizadas con el programa *“Universal Mechanism”*, de las cuales se han extraído los datos necesarios para elaborar las tablas y los gráficos en Excel que se muestran durante el proyecto.

2 COMPLEMENTOS TEÓRICOS

2.1 EL FERROCARRIL Y SUS CARACTERÍSTICAS

El ferrocarril es parte de un amplio abanico de transportes terrestres de todo el mundo, y que nos permite transportar personas y mercancías del lugar donde se encuentran al lugar donde quieren ir o donde son necesarias. [5]

Además, el ferrocarril es un medio de transporte de gran importancia en el mundo actual. Experimentó un fuerte impulso durante la revolución industrial, por tanto, está muy relacionado con el desarrollo económico. Es un medio de transporte muy peculiar, debido a que para su construcción requiere de una vía, por la cual sólo circula de forma eficiente un solo tipo de vehículo, el tren.

Igualmente, el ser un medio de transporte exclusivo trae consigo muchas ventajas como, por ejemplo, la eficaz capacidad de adaptación de las características del vehículo y la vía.

A continuación, se expondrán algunas de las características más relevantes de este medio de transporte.

- **Bajo consumo energético:** el ferrocarril ha demostrado ser el medio de transporte más cercano al modelo de desarrollo sostenible. Esto se debe a su bajo consumo energético, su gran capacidad de adaptación a las energías renovables y por sus bajas emisiones contaminantes. La razón de este escaso consumo energético tiene su origen en la baja resistencia a la rodadura del acero con el acero. [6]

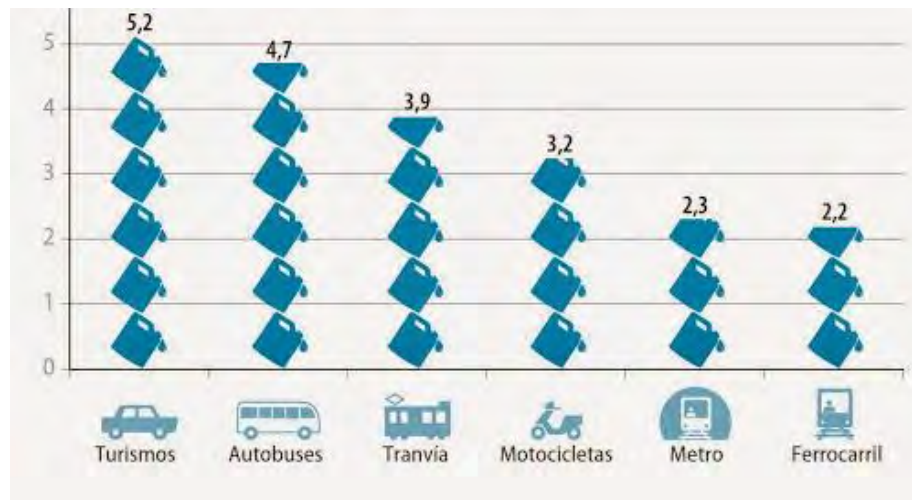


Figura 2.1: Consumo de energía (KEP*/100 personas-km) en cada medio de transporte en España (2012)

*KEP=Kilogramos equivalentes de petróleo. [7]

- **Alta velocidad:** para realizar desplazamientos de vehículos a gran velocidad y de forma segura, es necesario que éstos sean forzados a seguir una trayectoria fija. Para ello, es fundamental el desarrollo de los vehículos y de las vías de forma conjunta para alcanzar altas velocidades. Los trenes de alta velocidad alcanzan velocidades superiores a 200km/h sobre líneas existentes actualizadas y sobrepasan los 250km/h sobre líneas especialmente diseñadas para ello. Gracias a esta rapidez, el tren es capaz de competir con el avión en un rango de distancia de 600 a 800km.



Figura 2.2: El tren italiano ElettroTreno ETR 200 fue el primer servicio comercial de tren de alta velocidad en 1939. Llegando a alcanzar los 203km/h de velocidad media. [8]

- **Seguridad:** la seguridad en este medio de transporte ha sido siempre un aspecto muy importante que se ha tenido muy en cuenta. En comparación con los transportes por carretera, el ferrocarril es superior en lo que a seguridad se refiere. Aunque, a pesar de todas las mejoras y normativas introducidas, los accidentes ferroviarios tienen gran resonancia en la opinión pública. Sin embargo, el tren de alta velocidad está considerado como el medio de transporte más seguro del mundo por delante incluso que el avión. En los últimos cuarenta años, solo han ocurrido cinco accidentes ferroviarios en los que ha habido que lamentar víctimas mortales. [8]

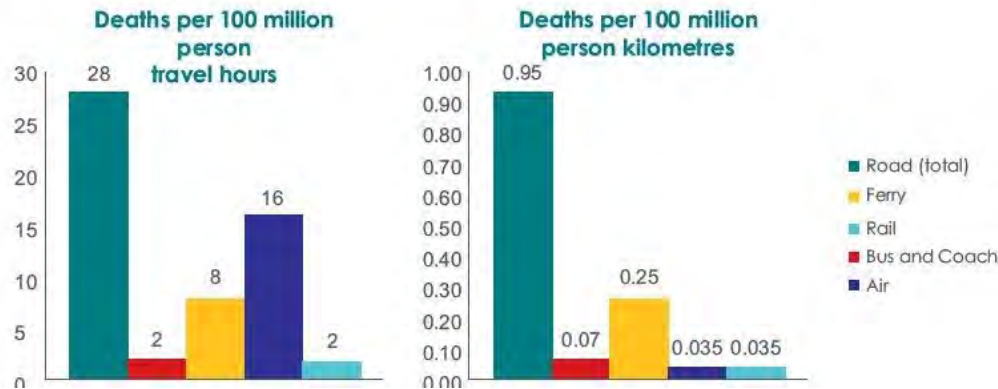


Figura 2.3: Riesgo de muerte para los diferentes medios de transporte de la Unión Europea en el periodo 2001/2002. [9]

- **Regularidad y puntualidad:** esta característica se mide en función del porcentaje de trenes que llegan con un retraso inferior a un determinado tiempo, pueden ser minutos o segundos. En nuestro país, la regularidad y puntualidad actual ronda el noventa por ciento para los trenes de larga distancia y supera este valor para los cercanías.
- **Capacidad:** en cuanto a la capacidad, el transporte ferroviario es claramente superior al transporte por carretera. Además, hay que tener en cuenta que la extensión ocupada para transportar la misma capacidad en ferrocarril es menor que en carretera. La capacidad de transporte de pasajeros en ferrocarril es de hasta 50000 personas/hora y en el caso de mercancías es de 60000 toneladas/hora.
- **Contaminación:** las líneas de ferrocarril están electrificadas en su gran mayoría, y la tendencia actual es hacerlo con aquellas que presentan un nivel de tránsito determinado. Por tanto, se puede decir que el transporte ferroviario es poco contaminante en cuanto a contaminación química se refiere. Sin embargo, la contaminación acústica de los trenes de alta velocidad que circulan por las proximidades de zonas residenciales sí que puede ser un problema importante.

Aun así, puede decirse que el ferrocarril es menos dependiente del petróleo que el transporte por carretera, ya que la energía eléctrica que consume puede ser producida por centrales hidráulicas o nucleares.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS FERROCARRILES

La clasificación de los ferrocarriles puede realizarse de formas muy diversas dependiendo del punto de vista que se escoja. A continuación, se muestran algunos tipos de clasificación dependiendo de diferentes factores. [3]

- **Según el ancho de vía:** dentro de este tipo de clasificación encontramos por un lado ferrocarriles de vía ancha ($a_v > 1435\text{mm}$) como los son RENFE o el AVE y, por otro lado, ferrocarriles de vía estrecha (FEVE) que engloba a todos los trenes con una anchura de vía inferior a la internacional.
- **Según el tipo de tracción:** en este caso podemos encontrar tres tipos de vehículos diferentes, de tracción eléctrica, por vapor o por motores de combustión interna.
- **Según la transmisión de esfuerzo:** para esta forma de clasificación distinguimos los siguientes tipos de tren:
 - Convencionales: basados en la adherencia rueda-carril con límite a pendiente máximas de 60 milésimas.
 - Levitación: funcionan gracias al principio de atracción-repulsión magnética.
 - Tren cremallera: son aplicables hasta pendientes de 500 milésimas.
 - Mixtos
 - Funiculares
 - Tracción por cable
- **Según el régimen de explotación:** aquí encontramos tres tipos de trenes: públicos, privados y mixtos.
- **Según ámbito geográfico:** encontramos trenes de largo recorrido para tráfico general (nacional e internacional), trenes regionales e interurbanos, cercanías y suburbanos, trenes urbanos (metropolitanos y tranvías), estratégicos y turísticos (montaña).
- **Según su importancia:** en este tipo de clasificación distinguimos las líneas principales y las líneas secundarias.
- **Según el servicio realizado:** los clasificamos en general, que son los trenes de interés nacional, regional o local, y particular, que incluye los trenes destinados para el uso minero, siderúrgico...
- **Según su aspecto jurídico:** para este caso nos encontramos con los trenes de concesión temporal o perpetua y los trenes de subvención estatal o no subvencionados.

2.3 LA VÍA COMO ESTRUCTURA

El camino de rodadura de los ferrocarriles, se estudia generalmente separándolo en dos componentes. Por un lado, la **infraestructura civil**, que engloba todas las obras civiles tales como túneles, desmontes, pasos y puentes o terraplenes que son necesarios para la construcción de la plataforma sobre la que se situará la vía.

Por otro lado, la **superestructura**, que se suele formar tradicionalmente por los raíles o carriles, los cuales se asientan sobre las traviesas transversales o también conocidas como losas rígidas de hormigón. Las traviesas y sus sujeciones, en el caso de la vía clásica, han ido apoyadas sobre una especie de capa o lecho diseñado para poseer cierta elasticidad, el cual está formado a su vez por el balasto y las capas inferiores o sub-balasto. [10]

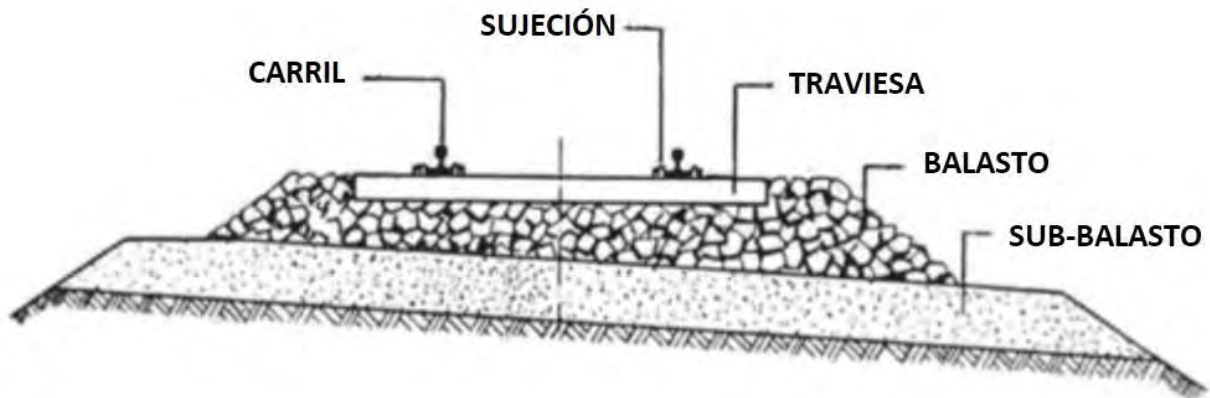


Figura 2.4: Composición de la superestructura de la vía

En los ferrocarriles es común usar ruedas de acero sobre raíles de acero. Sin embargo, desde hace algún tiempo se han usado en algunos lugares ruedas de goma sobre plataformas de hormigón. De todas formas, las ruedas de acero sobre carriles de acero es la opción más utilizada debido a su mínima resistencia al avance, el pequeño desgaste de los carriles y ruedas y la gran capacidad de carga que puede soportar cada rueda.

Con el fin de conseguir estas ventajas anteriormente nombradas, se deben tener en consideración unas características especiales siempre que estudiemos un ferrocarril. A continuación, explicaremos brevemente las dos características principales: el ancho de vía y la conicidad de llantas.

2.3.1 ANCHO DE VIA

El ancho de vía es la mínima distancia entre las caras interiores de las cabezas de los dos carriles medida a 15mm por debajo del plano de rodadura. Este parámetro es el que define la vía ferroviaria ya que limita los tipos de trenes que pueden circular por ella.

En un principio, los anchos de vía no eran un factor al que se le diera mucha importancia ya que cada red de ferrocarril tenía un servicio muy concreto y localizado. Fue a raíz de la Revolución Industrial, que exigía la interconexión entre diferentes líneas para que el material remolcado pudiera pasar de unas redes a otras. Por esta razón, se estableció un ancho de vía internacional en la Conferencia de Berna (1907), cuya medida era 1435mm. Este ancho se denominó ancho nominal y en relación a este existen también ferrocarriles de vía estrecha y vía ancha.

En España se estableció en el año 1844 en el Pliego General de Condiciones Generales un ancho de vía equivalente a 6 pies castellanos, lo que supone un valor de 1668mm, conocido también como ancho ibérico.

2.3.2 INFRAESTRUCTURA

La infraestructura podríamos definirla como el terreno base sobre el que se coloca la vía, también se conoce comúnmente como explanación o plataforma. Está compuesta por obras de defensa, como pueden ser los muros de contención y sostenimiento, drenajes... y por las obras de fábrica, como por ejemplo túneles, viaductos o puentes. [11]

- **Las obras de fábrica:** son aquellas que se encargan de proteger la vía de los obstáculos y fenómenos de la naturaleza. Algunas de ellas son puentes, pasos a nivel, viaductos, túneles o pasos a distinto nivel.
- **Trazado:** compuesto por el trazado en planta, perfil longitudinal y los perfiles transversales.
 - **Trazado en planta:** para proyectar este tipo de trazado se usan principalmente tramos rectos y curvos. En la transición de un tramo recto y curvo aparecen valores críticos de la fuerza centrífuga. Para evitar el problema, se intercalan arcos de diferentes curvas llamadas curvas de transición.

La curva de transición más usada tanto en carretera como en ferrocarriles se llama Clotoide o Espiral de Cornu.

Además, en el trazado en planta también juega un papel importante los peraltes, utilizados para contrarrestar la fuerza centrífuga y evitar de esta forma el descarrilamiento de nuestro vehículo.

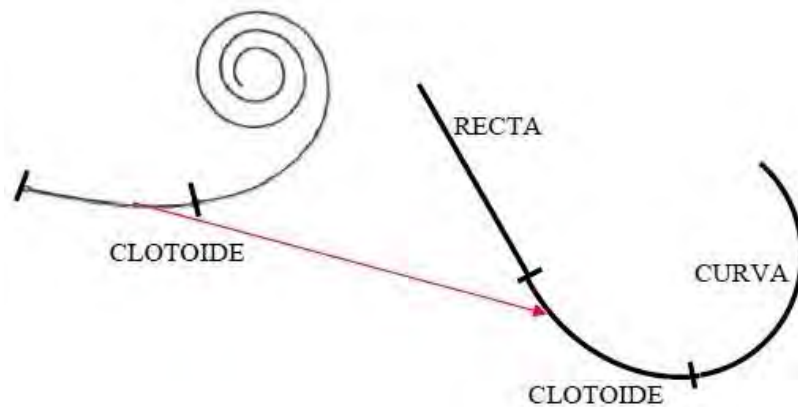


Figura 2.5: Clotoide.

- **Perfil longitudinal:** se denomina perfil longitudinal a la línea que une los distintos planos que componen el trazado de la vía, también conocidos como rasantes. Los rasantes que nos podemos encontrar son: *Rampas*, son planos inclinados en sentido ascendente. *Pendientes*, son planos inclinados en sentido descendente. Por último, *Horizontal*, cuando no encontramos declividad alguna.

Los puntos en los que se localiza un cambio en la inclinación, se denominan cambios de rasante.

- **Perfil transversal:** se conoce como la intersección de la plataforma con un plano vertical. Dentro de los perfiles transversales encontramos diferentes tipos de casos: trinchera (necesario vaciado de material), terraplén (necesario aporte de material), mixtas y en línea (solo requiere la correcta nivelación del terreno).

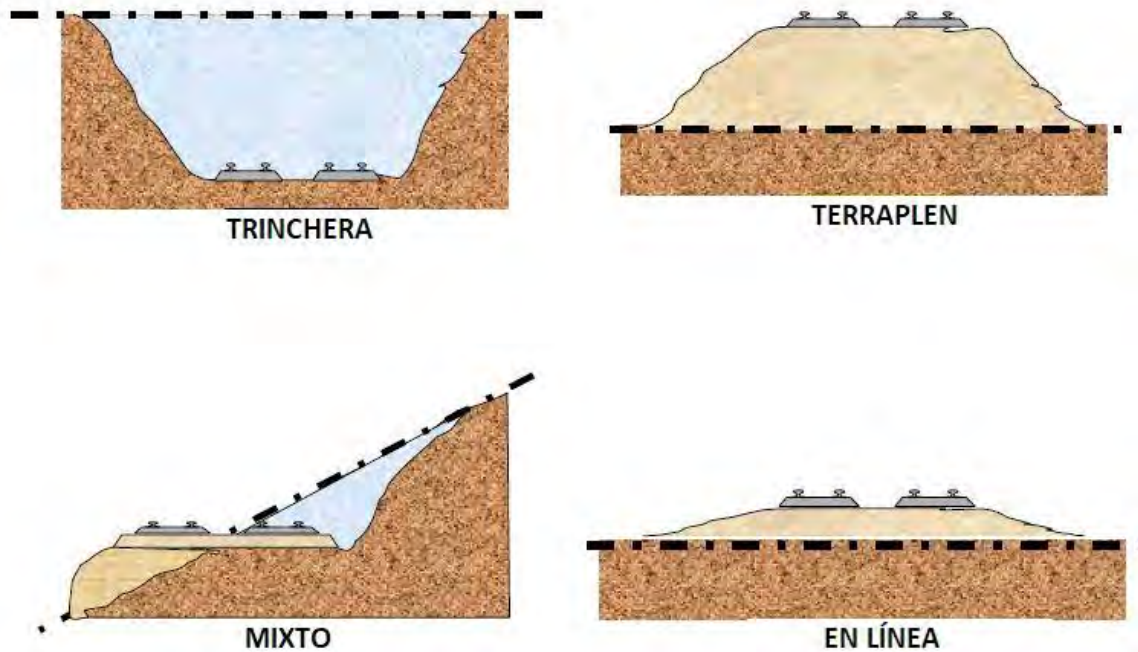


Figura 2.6: Perfiles transversales

2.3.3 SUPERESTRUCTURA

La superestructura está formada por la vía y por el conjunto de instalaciones y aparatos que se necesitan para garantizar una circulación eficaz y segura de los trenes. Además, como en el territorio español encontramos dos tipos de anchos de vía diferentes (ancho internacional y ancho ibérico), es necesario el uso de unas instalaciones llamadas cambiadores que nos permiten pasar de un ancho a otro. [11]

2.3.3.1 CARRIL

El carril es el elemento de la superestructura que soporta de forma directa el peso del tren. Actualmente, están fabricados de acero y la forma más utilizada para los carriles se denomina forma Vignole. Dentro del carril, y concretamente en los de forma Vignole, podemos distinguir tres partes: [10]

- **Patín:** zona ancha que actúa de base para que sirva como apoyo y además aporta estabilidad al tren.
- **Alma:** zona intermedia que une el patín y la cabeza del raíl. También se encarga de darle la inercia a flexión necesaria.
- **Cabeza:** es la parte que soporta directamente los esfuerzos procedentes del contacto con la rueda y es la zona que sufre el desgaste de forma directa.

Las funciones principales del carril son las siguientes:

- Resistir y transmitir la carga del material rodante a los demás elementos de la vía.
- Guiar al vehículo y proporcionar la adhesión necesaria para el frenado y la aceleración.
- Conducir la corriente de electrificación y señalización.

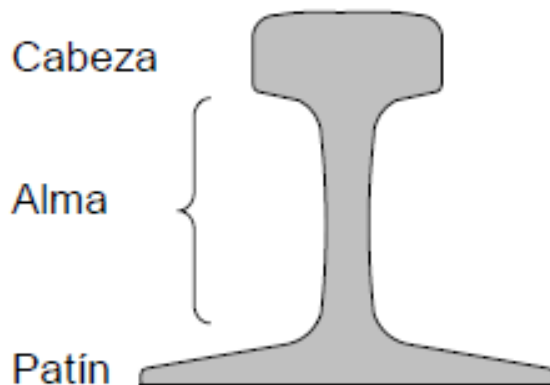


Figura 2.7: Partes del carril (Forma Vignole)

2.3.3.2 TRAVIESAS

La traviesa es el elemento transversal de la vía, está situado en medio del carril y el balasto y forma lo que se conoce como el emparrillado de la vía. [10]

Las funciones principales de este elemento de la vía son:

- Servir de soporte a los carriles.
- Mantener el ancho de la vía, así como su nivelación, y la inclinación de los carriles.
- Resistir los esfuerzos ejercidos por el tren en las tres direcciones y los recibidos por el carril, y transmitirlos al balasto.
- Debe aislar un carril de otro.

Antiguamente, se usaban mucho las traviesas metálicas, pero en la actualidad, las más usadas son las de madera o las de hormigón armado y hormigón pretensado. El peso es un factor muy importante que debemos tener en consideración, ya que cuanto más pese nuestra traviesa, más estabilizará, pero más gasto de manipulación conlleva. Otro factor es el espacio que se deja entre ellas, ya que un espacio muy pequeño haría imposible el bateo y un espacio muy grande no nos proporcionaría la estabilidad suficiente. En España, la distancia normal entre las traviesas es de 60cm.

La clasificación de las traviesas se hace en función de su forma. En la siguiente figura podemos encontrar un resumen de esta clasificación.

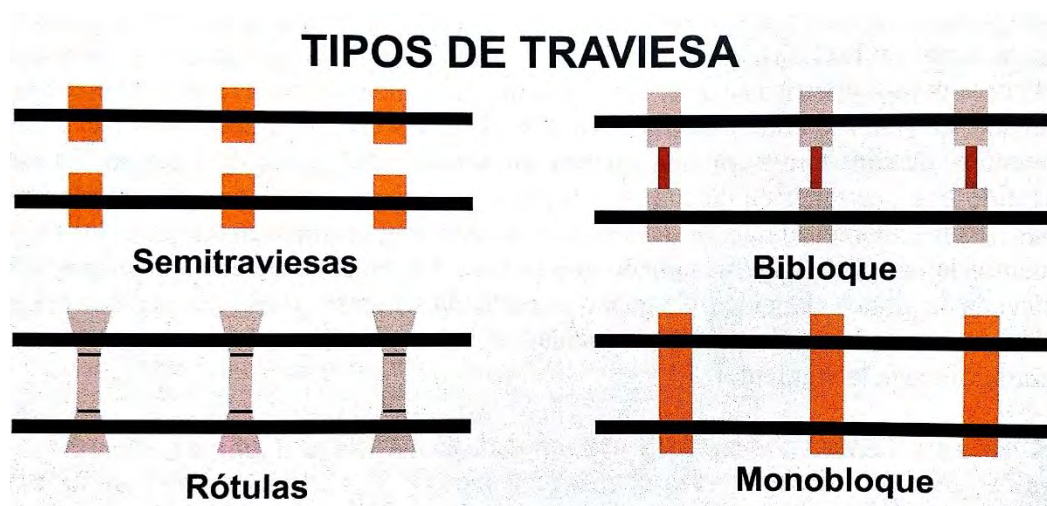


Figura 2.8: Tipos de traviesa según su forma. [3]

2.3.3.3 SUJECIONES

La sujeción es el elemento que aporta la continuidad estructural a la vía, ya que es el encargado de sujetar el carril a la traviesa o al bloque de la vía en placa. Es un elemento que implica mucha mano de obra en su reparación y por tanto es normal usar sujeciones de tipo 'ajusta y olvidar' ('fit and forget'). [10]

En un principio, su objetivo era evitar el desplazamiento y el vuelco del carril sobre la traviesa en dirección longitudinal. Sin embargo, con la aparición del carril continuo, que es el que más se usa en la actualidad, la sujeción también se va a encargar de asegurar el carril en dirección transversal, de aquí el nacimiento de las sujeciones elásticas. Además, en las vías de placa, se le exige a la sujeción proporcionar la elasticidad que aportaban las traviesas y el balasto.

Las principales funciones de este elemento son las siguientes:

- Mecánicas en el plano transversal: mantener el ancho de vía y evitar el vuelco.
- Mecánicas en el plano vertical: mantener unidos verticalmente la traviesa y el rail, además de proporcionar la elasticidad requerida.
- Mecánicas en el plano horizontal y sentido longitudinal: impedir el desplazamiento relativo entre traviesa y carril.
- Eléctricas: proporcionar el aislamiento necesario entre ambos hilos de carril.

En lo que se refiere a la clasificación, podemos hacerlos de tres formas, según su disposición y existencia de los elementos básicos, según su naturaleza elástica y según el tipo del que sean.

- Según su disposición y existencia de elementos básicos:
 - Sujeciones directas: el carril se une directamente a la traviesa.
 - Sujeciones indirectas: el carril se une a la placa y ésta a su vez a la traviesa.
 - Mixta: variaciones de las anteriores.

- Según su naturaleza elástica:
 - Rígidas
 - Elásticas
 - Doblemente elásticas: sujeción carril-placa y placa-traviesa son elásticas.
- Según el tipo de fijación:
 - Sujeciones rígidas clásicas
 - Clavos elásticos
 - Sujeciones elásticas de lámina o grapa
 - Sujeciones elásticas de clip: la más usadas en la actualidad.
 - Sujeciones de apoyo, con el carril flotante

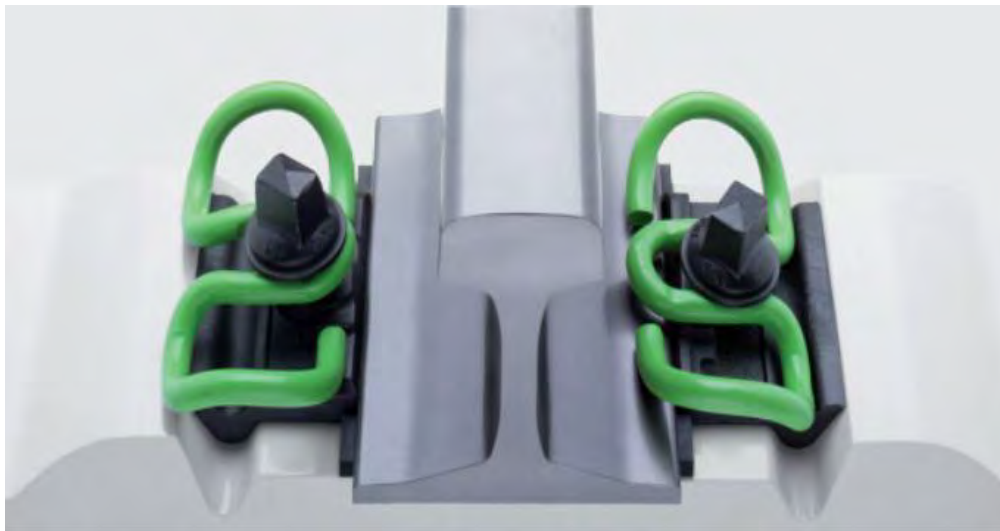


Figura 2.9: Sujeción "Vossloh" de clip

2.3.3.4 CAPAS INFERIORES O SUB-BALASTO

Las capas inferiores o sub-balasto, son capas de diferentes materiales, la cual se sitúa entre el balasto y la plataforma. El espesor de las capas no está establecido, sino que varía dependiendo del tipo de suelo, la geología del terreno y el clima del lugar. Este espesor es fundamental, ya que de él va a depender el correcto comportamiento de la vía. [10]

Las funciones del sub-balasto son las siguientes:

- Proteger la plataforma de la erosión provocada por la acción del balasto o por el agua.
- Proteger la plataforma de las bajas temperaturas y heladas.
- Repartir las cargas transmitidas a la plataforma.

2.3.3.5 BALASTO

El balasto es un tipo de material granulado, proveniente preferiblemente de piedra silícea, que tiene una granulometría que oscila entre los 40 y 150 mm aproximadamente. El balasto se utiliza fundamentalmente como base de pavimentaciones. A continuación, se muestran las principales funciones de este elemento: [10]

- Aportar estabilidad a la vía, manteniendo la geometría durante la construcción de ésta.
- Distribuir las presiones que transmite la vía al terreno, de tal forma que puedan ser soportadas y no sobrepasen las tensiones admisibles de las capas inferiores.
- Ofrecer una buena amortiguación de las vibraciones que genera el ferrocarril cuando circula sobre los raíles.
- Permitir el drenaje de las aguas pluviales, para así evitar el deterioro de la vía.

La gran ventaja que proporciona el balasto es que como está formado por partículas independientes unas de otras, aporta la elasticidad necesaria para la vía ya que puede moverse. Sin embargo, esta es también la causa de una de sus principales desventajas, ya que permite la deformación de la vía a lo largo del tiempo bajo el peso de las cargas que circulan sobre ella. Esto obliga a realizar costosos mantenimientos de la geometría de la vía.

Para evitar este problema, se está experimentando desde hace años para intentar unir las partículas de balasto, pero que a su vez permita un pequeño movimiento relativo entre ellas que proporcione la flexibilidad exigida por la vía.

Otra solución que se está dando principalmente en ferrocarriles metropolitanos y tranvías, es la del uso de la vía de placas, en las que la vía va construida sobre una placa de hormigón que aporta la flexibilidad necesaria a la vía. Sin embargo, se siguen construyendo muchos kilómetros de vía con balasto debido a su bajo coste.

2.3.3.6 VÍA EN PLACA

La vía en placa está directamente relacionada con la alta velocidad. Surgió como una alternativa a la vía tradicional en balasto con el objetivo de disminuir las labores de mantenimiento y, por tanto, su coste.

El aumento de la velocidad y del tráfico en las líneas de alta velocidad suponen una mayor exigencia sobre el balasto, lo que a su vez provoca una mayor degradación del mismo. Para trenes que circulan a más de 300 km/h, además de producir un gran desgaste sobre el balasto, también generan problemas de vuelo de balasto. La circulación a estas velocidades provoca el levantamiento del balasto, que vuela y golpea entre carril y llanta y los bajos del tren. Debido al peligro que esto supone, los elevados costes del mantenimiento de las vías tradicionales y otros factores, han hecho que algunos países como Japón, desde 1980, y Alemania, desde 1994, decidieran construir todas sus nuevas vías de alta velocidad en placa. [12]

A continuación, se describen las ventajas y los inconvenientes más destacados de la vía en placa. Las ventajas más relevantes de este tipo de vía son:

- **Bajo mantenimiento durante su vida útil.** La vía no necesita de bateo ni limpieza como ocurre con la vía sobre balasto. Esto se ve reflejado en el coste, que supone el 20-30% del coste de vía sobre balasto.

- **Mayor ciclo de vida.** La vía en placa tiene un ciclo de vida de aproximadamente 50-60 años, superior a los 30-40 años de la vía sobre balasto.
- **Excelente estabilidad.** Lo que supone un mayor confort para los viajeros y un menor desgaste de la vía.
- **Desaparición del problema de vuelo de balasto.**
- **Proporciona una mayor resistencia al desplazamiento lateral.** Esto hace posible la construcción de peraltes más altos y menores radios de curvatura, lo que supone una mayor adaptación a la geografía del entorno y un menor impacto medioambiental.

En lo que se refiere a los inconvenientes, se encuentran:

- **Mayor coste de construcción.** La construcción de la vía en placa es más cara, por lo que la inversión inicial es mayor.
- **Mayor coste de reparación.** En caso de producirse un descarrilamiento y como consecuencia un daño a la vía, la reparación es costosa y puede suponer largos cortes de tráfico.



Figura 2.10: Vía en placa de hormigón en Alemania. [13]

2.4 MATERIAL RODANTE

El material rodante ferroviario se denomina a todo aquello que es apto para la circulación sobre la vía férrea. Coloquialmente, el material rodante se conoce como tren. Está compuesto por locomotoras, automotores, coches, vagones y maquinaria de la vía para el mantenimiento de ésta. [11]

Lo podemos clasificar en dos bloques:

- **El material motor:** compuesto de un motor para su autopropulsión y para la tracción del material rodante. Dentro de este bloque encontramos:
 - **Locomotoras:** pueden ser de tracción diésel o eléctricas. Están diseñadas para realizar maniobras con el material remolcado, y para la reparación y mantenimiento de la vía. La locomotora es el elemento encargado de remolcar los coches y vagones que forman los trenes, tanto si es de viajeros como si es de mercancías.
 - **Automotores:** los automotores o también conocidos como *trenes autopropulsados*, además de poseer motor propio, están destinados para transportar carga sobre sí mismos. Al igual que en las locomotoras, existen dos tipos de tracción, diésel y eléctrica, tanto para trenes de alta velocidad como para convencionales.
- **El material remolcado:** se define como aquel que para su desplazamiento necesita estar conectado al material motor. Podemos clasificarlo en:
 - **Coches:** son los vehículos destinados al transporte de viajeros, aunque comúnmente se les llama, de forma incorrecta, vagón de viajeros. Dentro de los coches, podemos encontrar diferentes tipos, como, por ejemplo: de 2ª clase, preferente, turista, litera o coches que prestan un servicio al tren, como por ejemplo son los cafetería o restaurante.
 - **Vagones:** son aquellos vehículos destinados al transporte de cualquier tipo de mercancía. Sin embargo, podemos encontrar vagones especializados dependiendo del tipo de mercancía que vayan a transportar. Encontramos vagones tolva, cisterna, cerrados, plataforma contenedores, plataforma automóviles...

2.4.1 EL BOGIE

El bogie es una estructura que sustenta las cajas ya sean de locomotoras de coches de viajeros, de vagones de carga o de coches de transporte ferroviario.

Generalmente, se colocan dos bogies en cada coche, vagón o locomotora, uno por extremo. De esta forma, el bogie sirve como elemento de unión entre dos de los componentes anteriormente nombrados, siendo ésta una configuración muy utilizada en vehículos articulados.



Figura 2.11: Bogie [3]

En lo que se refiere a las funciones principales del bogie, a continuación, se muestran algunas de ellas.

- Soportar la carrocería de los vagones
- Proporcionar estabilidad tanto en curva como en recta.
- Asegurar el confort de la marcha absorbiendo las vibraciones y reduciendo las fuerzas centrífugas durante el paso por curva.
- Reducir la abrasión de los raíles y minimizar las irregularidades de la vía.

En cuanto a su composición, el bogie está formado por un bastidor de acero o chapa soldada. Para la fijación de los diferentes elementos, cuenta con una o dos traviesas. También contiene los elementos de tracción, en caso de que se tratase de un bogie motor. Además, cuenta con el equipamiento de frenado, que puede estar formado por zapatas de freno o frenos de disco y pastillas. Contiene también al menos un juego de ruedas, compuestas por los rodamientos y las ruedas en sí. Asimismo, posee diferentes elementos de control como puede ser la caja de grasas o sensores de inclinación.

Por otro lado, comentar que en el bogie va instalado el sistema de suspensión, encargado del filtrado de las vibraciones, la transmisión de los esfuerzos y el guiado de las ruedas. En los bogies la suspensión se realiza en dos etapas, conocidas como suspensión primaria y suspensión secundaria.

Por último, distinguimos dos tipos de bogies, los articulados y los no articulados. Los bogies articulados soportan el peso de la parte trasera de un vagón y el peso de la parte delantera del siguiente vagón, mientras que los bogies no articulados soportan únicamente el peso de un vagón.

A continuación, se muestra una breve descripción de los componentes de un bogie. Sin embargo, se presentará más en detalle los elementos de la suspensión, ya que es el elemento en el que nos vamos a centrar en el proyecto.

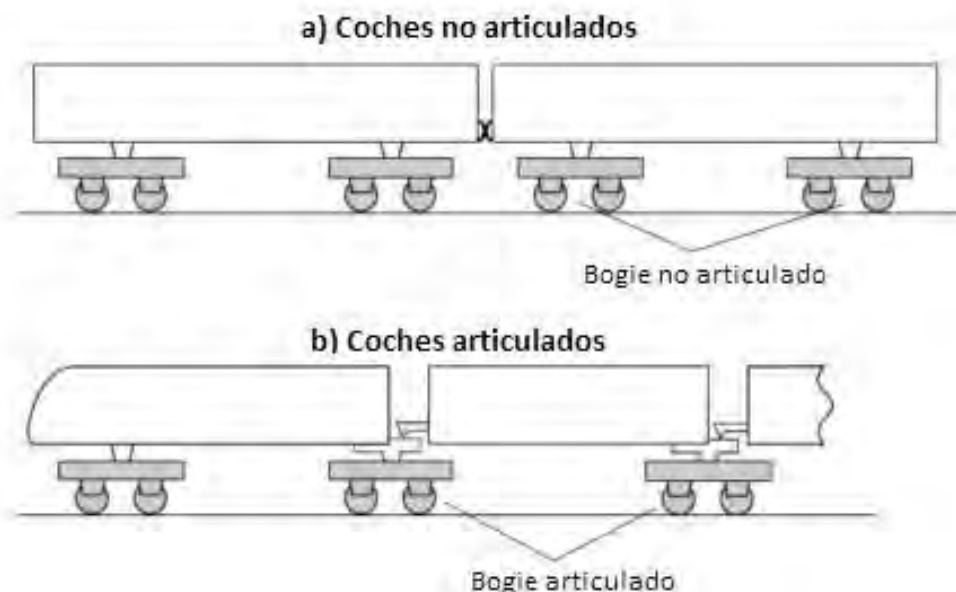


Figura 2.12: a) Bogies no articulados, b) Bogies articulados [14]

2.4.1.1 BASTIDOR

El bastidor constituye la estructura metálica o armazón que conforma el conjunto del bogie. Además, sirve como elemento fijador de los ejes, las ruedas, el motor, la suspensión...

Normalmente, se fabrica de acero soldado e implica unos requerimientos muy exigentes, lo que demanda unos métodos de fabricación muy rigurosos. Se trata de un componente de gran importancia y que debe soportar grandes esfuerzos en las tres direcciones, por eso tras su fabricación, es muy común realizar ensayos a fatiga e inspecciones para asegurarnos de que no se forman grietas. [10]



Figura 2.13: Bastidor.

2.4.1.2 JUEGO DE RUEDAS

El eje montado está formado por dos ruedas unidas de forma fija a un eje común. Esto proporciona a las ruedas la misma velocidad angular y hace que ambas se mantengan a una distancia constante durante la circulación. [15]

Este componente debe proporcionar:

- Una distancia constante entre el vehículo y la vía.
- El guiado que determina el movimiento dentro del ancho de vía, incluso en agujas y curvas.
- Servir como medio de transmisión de las fuerzas de tracción y frenado a los carriles, para permitir la aceleración y deceleración del vehículo.

Por otro lado, el diseño del juego de ruedas va a depender de:

- El tipo de vehículo (si ejerce tracción o arrastre).
- El tipo de sistema de frenado (disco de freno en el eje, de zapata o disco de freno en la rueda).
- La construcción de la rueda y la posición de los cojinetes con respecto al eje (exterior o interior).
- El deseo de limitar las fuerzas de una frecuencia más elevada mediante elementos elásticos entre la llanta y el centro de la rueda.

El conjunto de las ruedas y los ejes son las partes más críticas del material rodante ferroviario. Cualquier imperfección, fallo en la geometría o fallo mecánico puede provocar un descarrilamiento. Las ruedas se pueden clasificar en: macizas, con llantas y ensambladas.

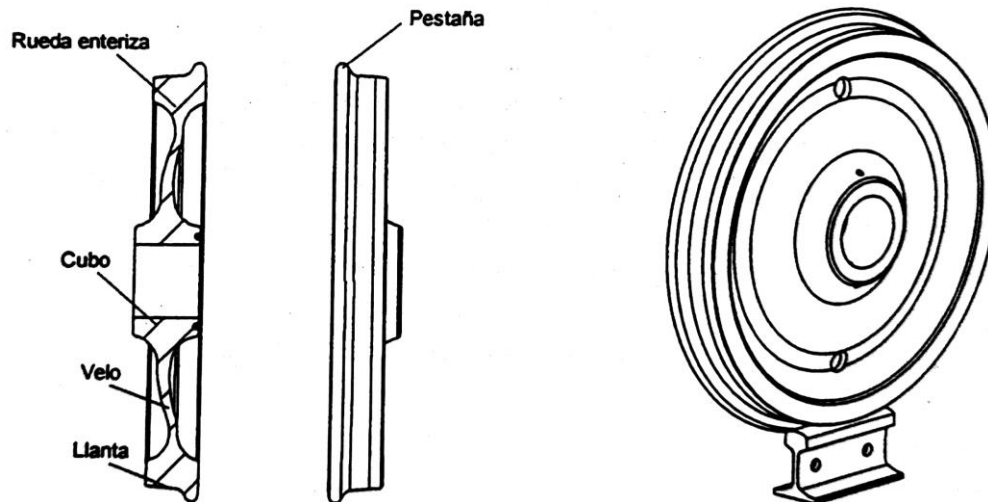


Figura 2.14: Rueda con llanta y sus partes. [3]

La finalidad del juego de ruedas es compensar de una forma natural la diferencia de camino que recorren las ruedas del carril exterior y del carril interior en el paso por curva y sin que se produzca deslizamiento. Para solucionar éste fenómeno, las ruedas están diseñadas con una geometría cónica, que permitirá compensar esa diferencia de camino recorrido por cada una.

2.4.1.2.1 CONICIDAD DE LLANTAS

Las llantas de las ruedas de los ferrocarriles nos pueden parecer que tengan forma cilíndrica, pero en realidad presentan son cónicas. Esta conicidad tiene el objetivo de disminuir la tendencia al descarrilamiento del tren, y, además, permite que, al circular por una curva, la rueda exterior no lo haga sobre una trayectoria circular de mayor diámetro que la rueda interior. En el paso por curva, la fuerza centrífuga que sufre el ferrocarril lo hace desplazarse hacia el exterior, lo que hace que se produzca el fenómeno anteriormente nombrado si la conicidad es la correcta. Como consecuencia de este fenómeno, los deslizamientos de las llantas sobre el carril son pequeños, disminuyendo así el desgaste. Por lo general, la inclinación de la llanta suele ser de 1:20, igual que la inclinación del carril sobre el que rueda. [3]

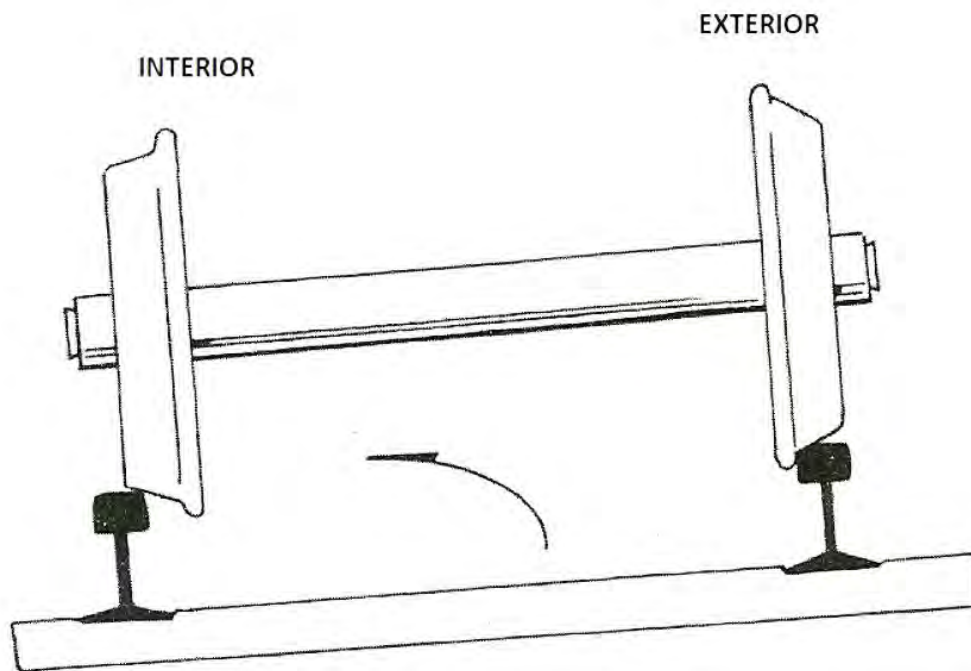


Figura 2.15: Conicidad de llantas

2.4.1.3 CAJAS DE GRASA

Se conoce como caja de grasa al elemento que hace la función de enlace entre el eje y la suspensión del vehículo ferroviario, para que se produzca la transmisión de esfuerzos y permitir de esta forma el giro del eje. [3]

Recibe el nombre de caja de grasa porque tradicionalmente se trataba de un elemento que envolvía el cojinete de fricción, protegiéndolo y almacenando el lubricante de engrase. Sin embargo, en la actualidad, las cajas de grasas están formadas únicamente de rodamientos de bolas, de rodillos cilíndricos o de rodillos cónicos.

Están fabricadas de hierro estampado o de acero moldeado y de una sola pieza. Su forma exterior depende del tipo de suspensión del vehículo.

Actualmente, se están empleando rodillos sensorizados que son capaces de registrar la temperatura y la velocidad de giro de las ruedas, para detectar posibles bloqueos.

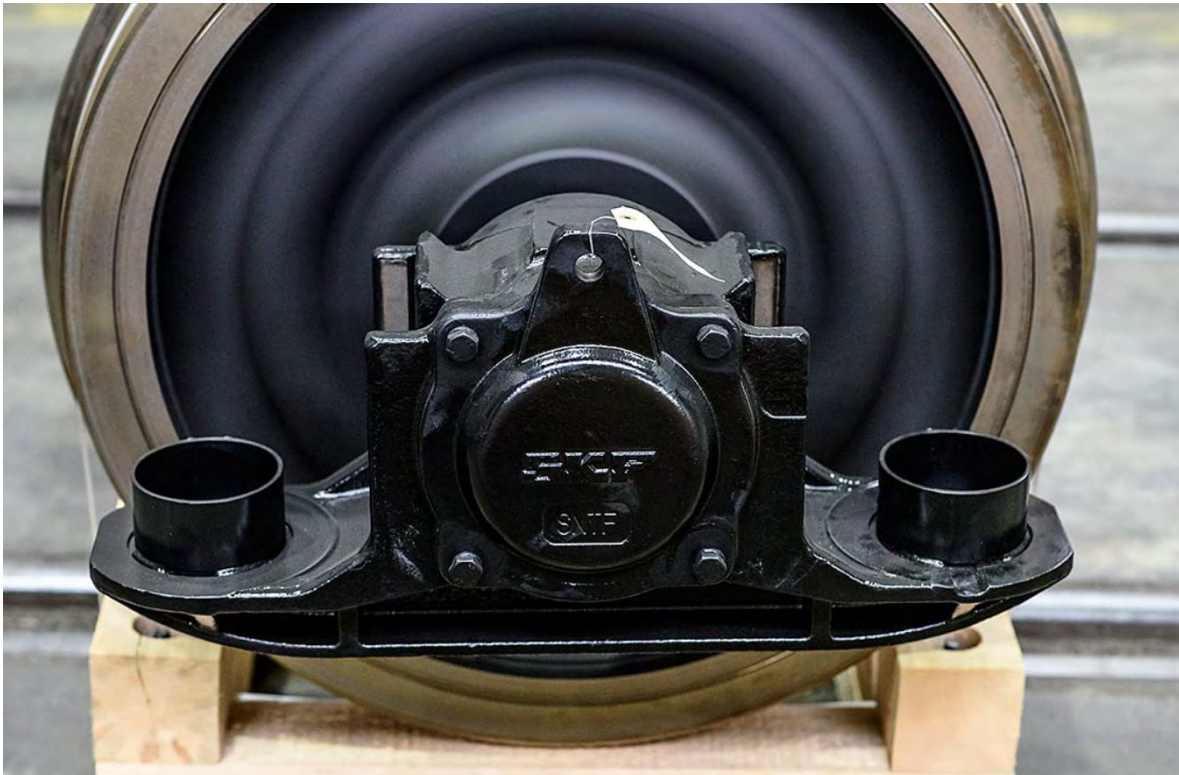


Figura 2.16: Caja de grasa.

2.4.1.4 TRANSMISIÓN

La transmisión es el conjunto de mecanismos o instalaciones que permiten transferir la potencia de los motores hasta las ruedas tractoras.

El diseño de las transmisiones es muy variado, y depende de parámetros como el tipo de motor utilizado, si la locomotora tiene ejes o bogies o del espacio disponible para alojarlos. Sin embargo, existen unos patrones o referencias que permiten ir probando y corrigiendo hasta dar con el montaje y desmultiplicación más óptimos.

Por otro lado, la velocidad de giro de salida de los motores, especialmente de los eléctricos, es demasiado elevada para transmitirlo directamente a las ruedas tractoras, por lo que es necesario reducirla mediante mecanismos reductores.

Estos mecanismos reductores, hacen que se pierda velocidad, pero se gane en fuerza. La fuerza es un parámetro muy importante, ya que nos puede ser de interés en ciertas circunstancias como por ejemplo remolcar grandes cargas o circular por rampas muy pronunciadas.

Las reducciones mecánicas sin de piñón, polea o engranaje pequeño a grande, al contrario que una bicicleta. En nuestro caso, un plato pequeño con un piñón trasero grande nos proporciona poca velocidad, pero gran potencia, y viceversa. [16]

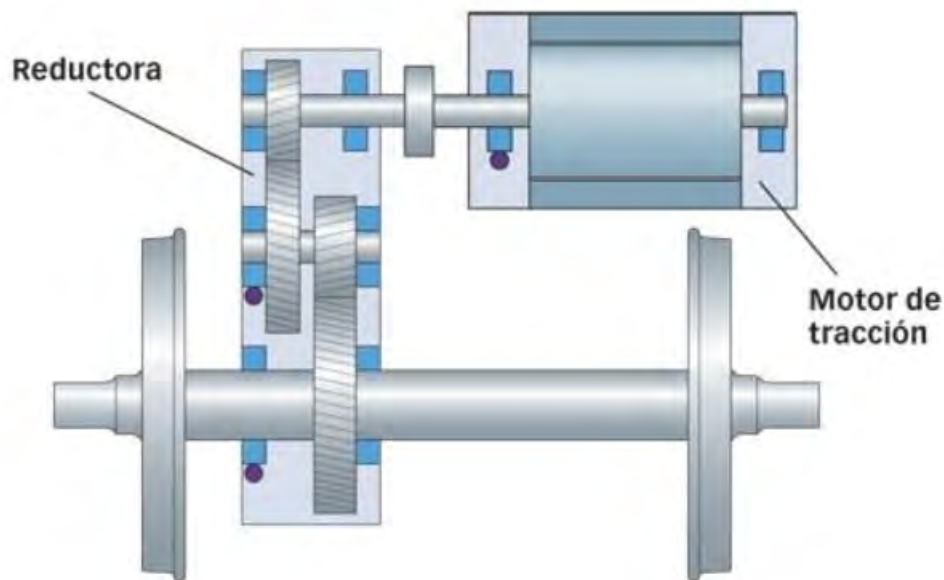


Figura 2.17: Transmisión.

2.4.1.5 FRENOS

Los ferrocarriles, al igual que los coches y otros vehículos, disponen de un sistema de frenado por razones de seguridad. Además, disponen de más de un freno, ya que los ferrocarriles son largos y muy pesados, y requieren de mayor distancia para detenerse.

A continuación, se muestra la clasificación de los frenos ferroviarios según su naturaleza de la energía utilizada:

- **Frenos de vapor**
 - Directos: si el vapor se emplea en cilindros especiales.
 - Contravapor: si el vapor se emplea en los cilindros motores de la locomotora.
- **Frenos eléctricos**
 - Reostáticos: su misión es que los motores de tracción funcionen como generadores y aporten corriente eléctrica. Para ello, la energía cinética es usada para calentar unas resistencias y obtener poder calorífico.
 - Regenerativos: es muy parecido al reostático, con la diferencia de que en este caso la energía se envía a la catenaria para que la usen otros trenes.
 - De adherencia: se usan para producir efecto de frenado. Se subdividen en:
 - Frenos electromagnéticos: rozamiento sobre el carril.
 - Frenos electromecánicos o de solenoide: rozamiento sobre zapatas.
- **Frenos neumáticos**
 - Frenos de aire comprimido
 - Frenos de vacío
- **Frenos manuales**

Otro tipo de clasificación diferente para los frenos ferroviarios es según la forma de absorción o disipación de la energía cinética.

- **Frenos mecánicos:** transforman la energía cinética en calor debido al rozamiento. Esto supone un desgaste en las zonas de contacto.
 - Frenos de zapata: es el tipo de freno que más se emplea. Poseen la forma del perfil de la rueda, y se aplican sobre la banda de rodadura. Es un

mecanismo sencillo y muy fácil de reemplazar, pero genera grandes fuerzas de fricción y altas temperaturas.

- Frenos de disco: poco a poco son más comunes. Su eficacia es mejor que los de zapata en malas condiciones meteorológicas y no dañan las llantas por debajo de los 120km/h. Sin embargo, son más costosos y generan ruido en el frenado.
- Freno de mordazas sobre el carril.
- **Freno de contravapor:** propios de las locomotoras de vapor.
- **Freno reostático o de recuperación:** propio de locomotoras eléctricas y diésel-eléctricas. [17]

Por último, una última clasificación de los frenos, en este caso, según su fin y la situación.

- **Freno de fricción:** Se controla por el microprocesador de la unidad de control de freno (EBCU: Electronic Brake Control Unit). El sistema de freno de fricción utiliza el aire comprimido, por medio del cilindro de freno y de las pastillas de las pinzas de freno, para presionar el disco de freno. El freno de fricción se controla continuamente por la unidad electrónica de control instalada en cada coche.
- **Frenos complementarios:** Son utilizados para no exceder las velocidades máximas de la línea, no hacer abuso del freno automático y, por lo tanto, como apoyo a este. Por lo general, los frenos complementarios pierden su eficacia a bajas velocidades por lo que los de aire son totalmente esenciales.
- **Freno de estacionamiento:** Son los usados para mantener detenido el material móvil durante los periodos en los que no presta servicio. Equivale al freno de mano en un turismo.
- **Freno directo:** Tan sólo lo poseen las locomotoras y solo actúa sobre ellas, independientemente de si remolca un tren o no. Su utilización solo debe efectuarse cuando se circula con la locomotora sola (aislada) o si remolcamos un tren y este se encuentra detenido, como medida de seguridad para afianzar su inmovilización.
- **Freno de urgencia:** Solo se utiliza, como su nombre indica, en caso de emergencia como el accionamiento de un aparato de alarma. Actúa de la misma manera y utiliza los mismos dispositivos que el freno de aire comprimido, con la única diferencia de que no se puede moderar y actúa de inmediato con su máxima potencia. [18]



Figura 2.18: Disco de freno.

2.4.1.6 SUSPENSIÓN

La suspensión tiene como funciones filtrar las vibraciones, transmitir los esfuerzos y guiar las ruedas. En los bogies la suspensión de los vehículos ferroviarios se realiza en dos etapas:

- **Suspensión primaria:** entre los ejes y el bastidor del bogie.
- **Suspensión secundaria:** entre el bastidor y la caja.

2.4.1.6.1 SUSPENSIÓN PRIMARIA

Anteriormente, hemos visto que el sistema de suspensión en los bogies se divide en dos etapas. Pues bien, en este apartado explicaremos más en detalle la primera etapa, que es la suspensión primaria.

La suspensión primaria está ubicada entre el conjunto de los ejes y ruedas y el bastidor del bogie. Se trata del primer órgano flexible entre el tren y dicho conjunto. Esta suspensión se consigue incorporando resortes de caucho o goma o mediante muelles que habitualmente van acompañados de amortiguadores. [19]

Las funciones de la suspensión primaria son las siguientes:

- Reducir el nivel de las vibraciones que soporta el bastidor y los elementos que hay sobre él.
- Repartir la carga de forma homogénea sobre las ruedas, para garantizar un buen funcionamiento de los sistemas de freno y tracción y evitar así el descarrilamiento.
- Guiar a los ejes en dirección longitudinal y lateral con el fin de proporcionar estabilidad dinámica al vehículo.

En lo que refiere a la complejidad de la suspensión primaria, aparentemente parece bastante simple, pero a medida que las sollicitaciones dinámicas y velocidades aumentan, su montaje se complica ya que pasa de ser un simple montaje de muelle y amortiguador a montajes mucho más complejos.

Además, en este tipo de suspensiones, es muy importante realizar un mantenimiento periódicamente ya que las suspensiones de caucho van reduciendo su altura con el tiempo debido a ciclo de histéresis y de fatiga del elemento elástico.



Figura 2.19: Suspensión primaria

2.4.1.6.2 SUSPENSIÓN SECUNDARIA

La suspensión secundaria es la segunda parte del sistema de suspensión, y junto con la suspensión primaria forman la suspensión de un vehículo ferroviario. Para un mejor entendimiento de cómo funciona la suspensión, a continuación, se muestra una imagen donde aparece el conjunto dinámico tren- vía. [19]

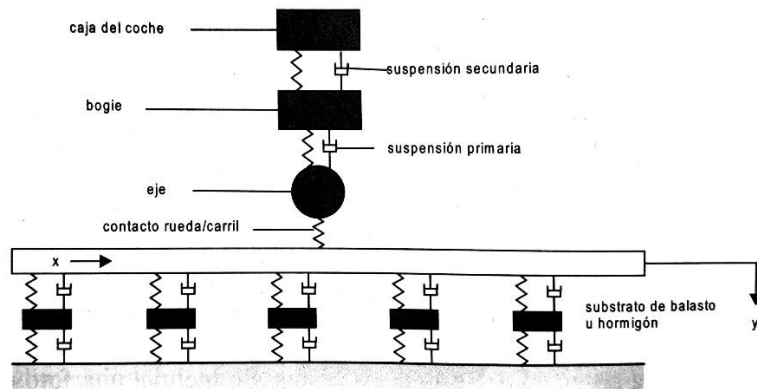


Figura 2.20: Modelo dinámico del conjunto tren-vía [3]

Como podemos observar, la suspensión secundaria se encuentra entre el bastidor y la caja. Está constituida por muelles o gomas o balones de aire comprimido sobre los que va montada la caja a través de una viga. Actualmente, los balones de aire están siendo muy utilizados ya que proporciona comodidad al viajero a velocidades moderadas. A continuación, vamos a mostrar las ventajas que este diseño ofrece:

- Mantenimiento es nulo o mínimo.
- Fácil regulación mediante la incorporación de mayor o menor presión según la carga de los viajeros.
- Mantiene constante el nivel de la altura.
- Proporciona información sobre la carga de los viajeros, la cual es útil para la regulación eléctrica de los motores y se esta forma, conseguir una aceleración y frenado óptimos.

2.5 SISTEMA DE SUSPENSIÓN

2.5.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

La suspensión es el conjunto de los elementos elásticos, los amortiguadores y demás componentes que conectan los ejes montados con la carrocería del coche.

El sistema de suspensión es común en todo tipo de vehículos, variando únicamente dimensiones y tipo de suspensión. La suspensión se sitúa por lo general entre el suelo del vehículo y el bastidor.

Este elemento es una parte fundamental y se debe tener muy en cuenta en el diseño de un vehículo, ya que de la suspensión dependen a su vez otras muchas prestaciones del vehículo como puede ser los esfuerzos entre la rueda y el raíl o la estabilidad y dinámica del mismo. Por todo esto, no se puede diseñar un sistema de suspensión teniendo en cuenta únicamente un aspecto afectado, si no que esta es una tarea de gran complejidad y en la generalmente trabaja un grupo de profesionales.

A continuación, se muestran las características y funciones principales que un sistema de suspensión debe proporcionar al vehículo.

- Soportar el peso del vehículo, así como permitir el movimiento elástico de forma controlada sobre los ejes.
- Absorber la energía producida por las irregularidades de la vía y garantizar la estabilidad del vehículo independientemente del estado y condiciones de utilización en el que se encuentre ésta.
- Garantizar la comodidad de los pasajeros y protección de las mercancías.

2.5.2 ELEMENTOS DE LA SUSPENSIÓN

Para garantizar las funciones de confort, seguridad, estabilidad y calidad durante la circulación de nuestro vehículo, son necesarios el uso de diferentes elementos. Generalmente, estos elementos se dividen en dos tipos:

- **Elementos elásticos:** se encargan de garantizar la unión entre los elementos de rodadura y el vehículo, proporcionando así una fuerza recuperadora cuando ocurre una separación entre ambos.

- **Elementos amortiguadores:** su función es disipar la energía, lo que hacen que desaparezca cualquier movimiento oscilatorio provocado por cualquier tipo de irregularidad que afecte a la suspensión.

Además, se podría añadir un tercer tipo de elementos a esta clasificación, que comprendería los elementos que realizan ambas funciones, o lo que es lo mismo, son elementos elásticos y de amortiguamiento.

Para mejorar la comprensión de los elementos de la suspensión, se ha de conocer las dos partes de las que consta un vehículo según esté soportada o no por el sistema de amortiguación.

- **Masa no suspendida:** se compone por el sistema de suspensión junto con los elementos que unen éste sistema a la vía, como son los ejes, los frenos, las ruedas...
- **Masa suspendida:** formada por la masa total que soporta el sistema de suspensión. Normalmente, está formada por el chasis, carrocería, grupo motor...

2.5.2.1 MUELLES HELICOIDALES

Los muelles helicoidales son seguramente el elemento de rigidez más usado en los sistemas de suspensión de los vehículos. Están compuestos por una varilla que forma una hélice, con un diámetro y un paso determinados, que trabaja a flexión y a compresión. Son elementos más compactos y precisos que las ballestas. [3]

En los vehículos ferroviarios, es habitual el uso de resortes montados concéntricamente, es decir uno dentro de otro, lo que equivale a dos muelles en paralelo.

Además, existe un caso particular de un tipo de muelles muy parecidos a los anteriores conocidos como “muelles helicoidales de fleje”. La única diferencia con los anteriores es que no presentan un comportamiento lineal. Se usan generalmente en la suspensión primaria de coches de viajeros.

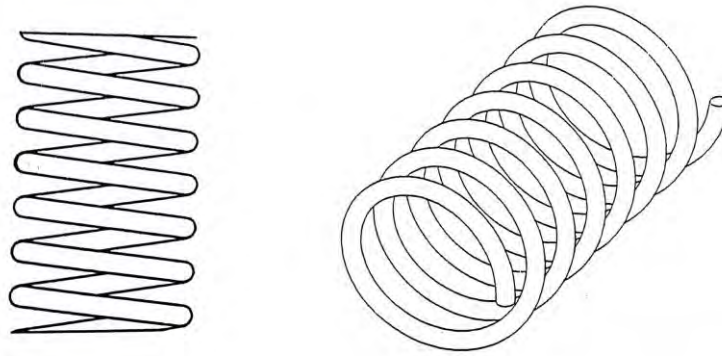


Figura 2.21: Muelle helicoidal.

2.5.2.2 BALLESTAS

Las ballestas son uno de los elementos de la suspensión más antiguos y que aún se sigue usando debido a sus ventajas en las que destacan su amortiguamiento propio, la capacidad de amortiguar grandes cargas y el guiado lateral y longitudinal del vehículo. [3]

Este elemento, está formado por diferentes hojas tanto de sección constante como variable (perfil parabólico o trapezoidal). Las láminas trabajan a tracción de forma conjunta y pueden presentar un comportamiento tanto lineal como no lineal.

Tradicionalmente, las ballestas se han usado también como elemento amortiguador aprovechando la fricción entre las hojas, pero debido a su complejidad y dificultad de regulación, se suelen usar combinándolas con amortiguadores hidráulicos.

En lo que se refiere a vehículos ferroviarios, se suelen usar ballestas de doble flexión, en las que en las hojas inferiores empiezan a deformarse a partir de una determinada carga. Las ballestas se usan sobre todo en trenes de mercancías debido a la gran capacidad de carga que presentan.

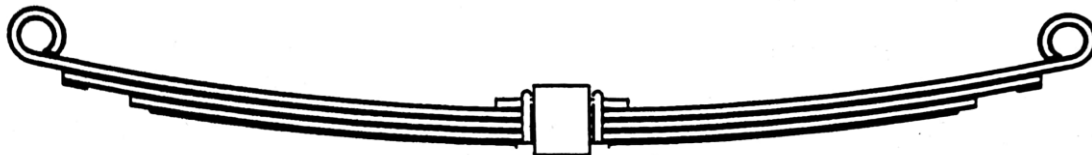


Figura 2.22: Ballesta

2.5.2.3 BRAZOS DE TORSIÓN

La barra de torsión es un elemento de alta rigidez, cuyo objetivo se centra en reducir el ángulo de balanceo que experimenta el vehículo a su paso por curva. Este ángulo, genera una fuerza lateral tanto sobre los viajeros, lo que puede ser motivo de incomodidad, como sobre el centro de gravedad, ya que éste queda desplazado y hace que se reduzca la carga que soportan las ruedas interiores y aumente en las exteriores, lo que provoca un aumento en las probabilidades de vuelco del vehículo en la curva.

En los vehículos ferroviarios, el uso de este elemento de suspensión, hace que la fuerza lateral sobre los viajeros se vea reducida y la velocidad de paso por curva aumente. Además, esto supone un aumento en el confort y seguridad en la marcha.

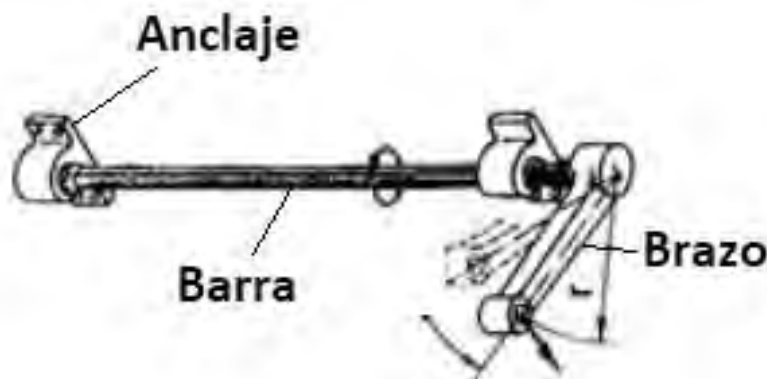


Figura 2.23: Brazo de torsión

2.5.2.4 RESORTES CAUCHO-METAL

Los resortes caucho-metal son usados frecuentemente en suspensiones de maquinaria y motores. Su función principal es la filtración de las vibraciones de alta frecuencia producidas por pequeños desplazamientos. La forma de este elemento es compleja y se comporta de forma no lineal. Debido a esto, se utiliza el método de elementos finitos para diseñar estos resortes, sus parámetros y dimensiones.

Generalmente, se usan en vehículos ferroviarios y forman parte de la suspensión primaria de éstos.



Figura 2.24: Resorte caucho-metal

2.5.2.5 RESORTES NEUMÁTICOS

Los resortes neumáticos se usan principalmente en el sistema de suspensión de vehículos pesados de carretera como autobuses y camiones, y en la suspensión secundaria de los vehículos ferroviarios.

El funcionamiento de los resortes neumáticos se basa en la compresibilidad del aire como elemento de suspensión. Consiste en un vástago que se desplaza dentro de un cilindro que contiene nitrógeno a una determinada presión que depende de la fuerza de resorte que se quiere ejercer.

Este tipo de resortes nos proporcionan ciertas ventajas con respecto los resortes tradicionales. A continuación, se muestran algunos de los más destacados.

- Nos proporcionan una frecuencia natural, casi independientemente de la carga que soporta.
- Filtran las altas frecuencias.
- Mantienen la altura de la suspensión constante, mediante la inyección y extracción de aire.
- Reducen los ruidos producidos por las ruedas y frenos, ya que no existe una unión mecánica directa entre la parte suspendida y las ruedas.
- Menos costos y más ligero que una suspensión metálica, especialmente si el vehículo ya dispone de suministro de aire comprimido.

2.5.2.6 AMORTIGUADORES

Los amortiguadores tienen el objetivo de devolver el resorte a la posición de equilibrio en el mínimo tiempo posible. Para ello, el amortiguador debe absorber la energía cinética transmitida a la masa suspendida y reducir el tiempo que la adherencia de las ruedas varía.

La amortiguación es proporcionada generalmente por dispositivos de amortiguación. Los tipos amortiguadores más usados son los de fricción y los hidráulicos.

Por un lado, los **amortiguadores de fricción** son los que más se utilizan en suspensiones de vehículos de carga debido a su simplicidad y bajo coste.

La principal ventaja que nos proporciona este tipo de amortiguadores es su capacidad de amortiguar las vibraciones en diferentes direcciones e incluso, en algunos casos, sirve de conexión elástica de las distintas partes del bastidor del bogie. Es por esto que su uso se centra generalmente en bogies de carga a pesar de sus inconvenientes, como por ejemplo la creación de fuerzas de fricción impredecibles o el hecho de que su reparación pueda requerir levantar la carrocería del coche y desmontar el sistema de resorte por completo.

Por otro lado, los **amortiguadores hidráulicos** se usan casi universalmente en bogies para el transporte de pasajeros, aunque también se están usando actualmente en trenes de carga modernos.

La energía que este tipo de amortiguador disipa, es proporcional a la velocidad, por tanto, lo es también a la frecuencia de vibración y a la amplitud. De esta forma, los amortiguadores hidráulicos se ajustan perfectamente a las excitaciones dinámicas y proporciona una amortiguación fiable.

Los tipos de amortiguadores más utilizados en los ferrocarriles son:

- **Amortiguadores de doble tubo presurizado:** su fluido de trabajo es aceite.
- **Amortiguadores de doble tubo no presurizados:** utilizan aceite y gas como fluido. Este tipo es el más económico para solucionar el problema del amortiguamiento.
- **Amortiguadores monotubo presurizados**



Figura 2.25: Amortiguador de doble tubo.

2.6 VISCOELASTICIDAD

En este apartado se van a explicar los conceptos básicos de la viscoelasticidad y los modelos básicos viscoelásticos. Con el propósito de ayudar a la comprensión del funcionamiento de los amortiguadores viscoelásticos.

En este proyecto vamos a centrarnos en la suspensión secundaria de un vehículo ferroviario, y más concretamente en un tipo de amortiguadores los cuales son de tipo viscoelástico. Para su análisis modificaremos algunos parámetros para conseguir un comportamiento determinado, y es por eso, que debemos conocer previamente algunos conceptos sobre viscoelasticidad. [20]

2.6.1 DEFINICIÓN DE VISCOELASTICIDAD

En ingeniería, es de gran utilidad conocer y predecir el comportamiento mecánico de los materiales poliméricos, ya que nos va a servir de gran ayuda para la optimización de su diseño y cálculo de sus componentes.

Además, se debe tener en cuenta que, en los polímeros, más que en cualquier otro material, los factores de temperatura y tiempo juegan un papel fundamental en el comportamiento mecánico. Normalmente, estamos acostumbrados a calcular las propiedades de los materiales sin tener en cuenta el tiempo, pero cuando trabajamos con polímeros se debe tener muy en consideración y esto va a cambiar la forma de abordar el problema.

Los materiales poliméricos poseen un comportamiento dual, viscoelástico. Por un lado, presentan una respuesta elástica, inmediata y no dependiente de la variable tiempo, propio del comportamiento de un sólido elástico. Por otro lado, ofrecen una respuesta más propia de un fluido viscoso. Por tanto, la viscoelasticidad debe ser afrontada desde un planteamiento doble, combinando un comportamiento puramente elástico y un comportamiento puramente viscoso.

A continuación, se presentan los modelos matemáticos, los cuales permiten simular el comportamiento viscoelástico de los polímeros y por tanto nos proporcionan la capacidad de predecir el comportamiento de un polímetro a largo plazo.

2.6.2 MODELOS BÁSICOS DE VISCOELASTICIDAD

Los materiales poliméricos nos ofrecen una respuesta dual, elástica y viscosa. Por un lado, presentan una deformación inmediata a causa de la aplicación de una fuerza sobre ellos y, por otro lado, presentan una deformación dependiente del tiempo cuando se les aplica una carga constante. Éste último tipo de deformación, se conoce como fluencia viscoelástica y juega un papel fundamental ya que de este parámetro y de la velocidad con la que se apliquen las cargas va a depender la reacción del material.

En los materiales elásticos, cuando aplicamos una carga constante sobre ellos, experimentan una deformación instantánea y proporcional a la carga aplicada. Este comportamiento lo representamos mediante un muelle o resorte y su comportamiento obedece la ley de Hooke (1).

$$\sigma = k \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Por el contrario, en los materiales puramente viscosos (fluido newtoniano), la deformación que experimentan no es instantánea, sino que va a depender del tiempo. Además, esta deformación no va a ser reversible o recuperable como ocurre con los materiales elásticos. Este tipo de comportamiento viscoso se representa mediante un embolo con fluido en su interior, y su comportamiento se rige por la ley de Newton (2).

$$\sigma = c \cdot \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

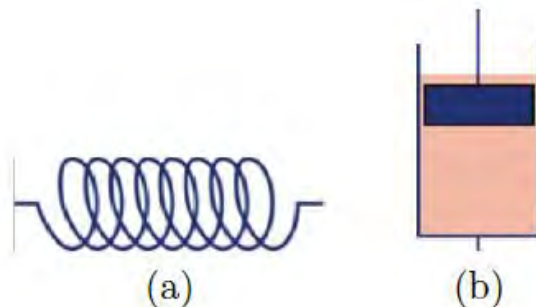


Figura 2.26: Representación esquemática de un a) sólido rígido-resorte y b) fluido viscoso-ébolo

De esta forma, para predecir el comportamiento viscoelástico de forma matemática, vamos a requerir de la combinación de ambos elementos. Cada uno de ellos caracterizado por un parámetro o constante. La constante elástica del modelo elástico se representa como k , y la constante viscosa del modelo viscoso se representa como c . Por lo tanto, combinando estos dos elementos básicos en serie o en paralelo, obtenemos los dos modelos simples de un comportamiento elástico y uno viscoso.

A continuación, estudiaremos el **modelo Maxwell** más en profundidad ya que es el modelo que vamos a utilizar durante el proyecto como veremos más adelante. El modelo Maxwell considera el elemento elástico y el viscoso, acoplados en serie, mientras que el **modelo Kelvin-Voigt** considera ambos elementos acoplados en paralelo.

2.6.2.1 MODELO VISCOELÁSTICO DE MAXWELL

El modelo de Maxwell considera que el comportamiento viscoelástico de un polímero se define como la combinación d un elemento elástico y un elemento viscoso acoplados en serie.

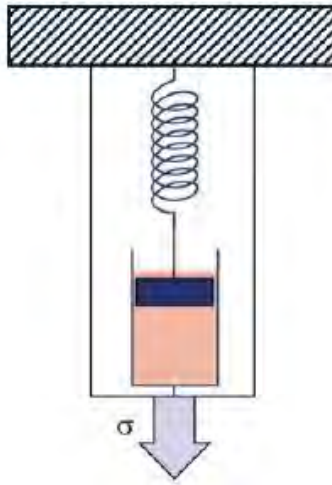


Figura 2.27: Representación esquemática del modelo viscoelástico de Maxwell

Por tanto, cuando aplicamos una fuerza sobre el polímero, éste tendrá un comportamiento dual. Por un parte, presentará una deformación o alargamiento instantáneo e independiente del tiempo, que se rige por la ley de Hooke. Por otra parte, debido a su parte viscosa, sufrirá una deformación que irá incrementado con el paso del tiempo y que está definida por la ley de Newton.

Dado que el acoplamiento de ambos elementos es en serie, la deformación total del polímero (ε), será la suma de deformación elástica (ε_1) y de la componente viscosa (ε_2), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

El modelo de Maxwell presenta una serie de puntos fuertes, pero también tiene limitaciones. El modelo es capaz de estimar la deformación elástica inicial pero la fluencia viscosa con el paso del tiempo es lineal, por tanto, no se ajusta a la realidad. Este modelo es un modelo sencillo, fácil de interpretar y analizar, y sirve como base para otros modelos viscoelásticos más complejos, como por ejemplo el modelo Burgers, que es una combinación de los modelos de Maxwell y de Kelvin-Voigt acoplados en serie.

2.6.3 AMORTIGUADORES VISCOELÁSTICOS

Durante el desarrollo del proyecto, vamos a trabajar con la amortiguación secundaria de un vehículo ferroviario. Los amortiguadores que vamos a analizar son de tipo viscoelástico y se van a comportar como tal.

Los materiales viscoelásticos debido a sus buenas características de amortiguamiento, son muy usados en ingeniería aeroespacial y mecánica para controlar la vibración de estructuras y máquinas. Algún ejemplo de estos amortiguadores viscoelásticos, son aquellos que están fabricados con polímeros, como la goma.

A continuación, se muestra el modelo matemático usado por el software Universal Mechanism, el cual va a ser nuestra herramienta para el análisis de los amortiguadores.

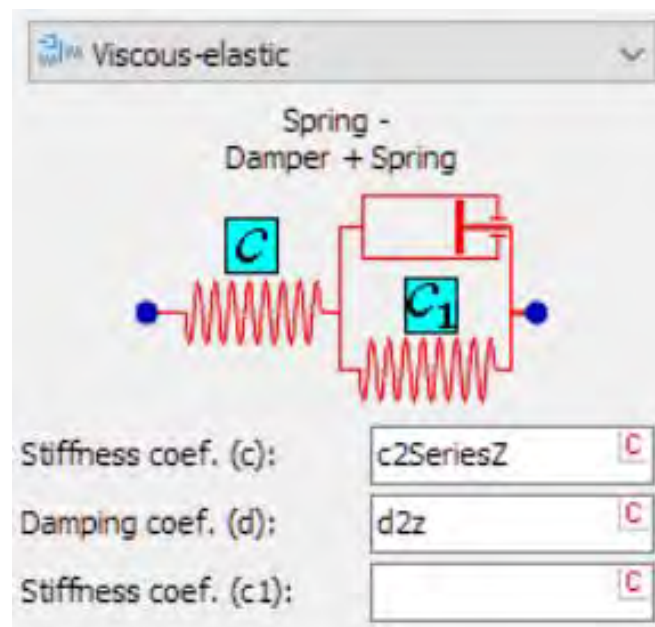


Figura 2.28: Representación del modelo viscoelástico empleado por el software UM.

Como se observa, nuestro modelo se compone de un resorte acoplado a un émbolo y otro resorte en paralelo. En la figura se puede ver como el valor de la constante elástica (c_1) del resorte que se encuentra en paralelo es nulo. Por tanto, si eliminamos ese elemento del modelo, nos quedamos con un muelle acoplado con un émbolo en serie, o también conocido como el modelo de Maxwell, que hemos explicado en el apartado anterior. De esta forma, nuestro modelo viscoelástico con el que trabajaremos en el proyecto, quedara representados de la siguiente manera.

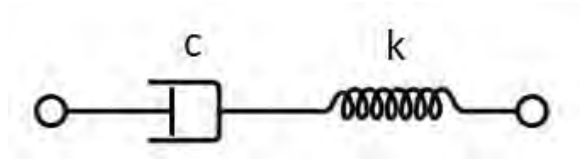


Figura 2.29: Modelo de trabajo (Maxwell) de UM.

3 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

3.1 INTRODUCCIÓN A “UNIVERSAL MECHANISM”

Universal Mechanism (UM), es un software ruso diseñado en el Laboratorio de Mecánica Computacional de la Universidad “Bryansk State Technical University”. El programa fue creado por más de quince ingenieros y dirigido por el profesor Dmitry Pogorelov [21]. UM está basado en las técnicas más modernas de diseño asistido por ordenador (CAD). El objetivo de la aplicación es la simulación y análisis de un amplio abanico de sistemas dinámicos y cinemáticos. En la actualidad, cuenta con distribuidores en más de veinte países repartidos por Asia y Europa mayoritariamente. Para la realización de este proyecto hemos utilizado la versión más reciente del programa, que fue publicada en octubre de 2016 y puede ser descargada accediendo a su página web.



Figura 3.1: Logo de Universal Mechanism [21].

El software está diseñado para el análisis y simulación de objetos mecánicos tales como automóviles complejos, locomotoras, vagones, robots o excavadoras. Estos objetos, son representados como un sistema multicuerpo. Dentro de estos sistemas, los cuerpos son representados como objetos rígidos conectados mediante fuerzas y elementos cinemáticos.

Gracias a este programa, podemos analizar un amplio rango de problemas que incluyan mecánica teórica y aplicada en dos y tres dimensiones. Además, UM facilita y agiliza la resolución de los problemas, ya que está diseñado para la trabajar con problemas muy complejos que incluyen gran cantidad de cuerpos rígidos. También dispone de varios módulos que incorporan una herramienta para la construcción de subsistemas que nos va a facilitar el trabajo, especialmente cuando nuestro sistema contiene varios subsistemas similares, para evitar así tener que introducir datos para cada subsistema individualmente.

Esto es útil, por ejemplo, para el análisis de un tren formado por la locomotora y varios coches con características idénticas.

Además, el programa cuenta con una interfaz simple e intuitiva y bien diseñada. Lo que hace que nos resulte más fácil trabajar con problemas de multicuerpos complejos. Como cualquier otro programa, los autores de UM han puesto mucho empeño para que el usuario entienda su filosofía y su lenguaje. Para ello, han elaborado un completo manual de usuario que es muy recomendable leer para poder exprimir al máximo el software y conocer todo su potencial. [22]

3.2 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

El software de Universal Mechanism, está formado por dos programas: **UM Input**, que hace la función de pre-procesador, y **UM Simulator**, encargado de la resolución y el post-procesado. Seguidamente, procederemos a explicar más detalladamente las características de cada uno.

3.2.1 UM INPUT

Este software es un pre-procesador que se usa para la descripción y la modificación de los diferentes modelos que vamos a analizar. Además, el programa le permite al usuario crear las ecuaciones de movimiento que va a obedecer el modelo durante el análisis. Otra característica muy interesante de este programa, es el entorno multi-proyecto, que permite abrir y trabajar con más de un modelo simultáneamente. [23]

Este programa tiene una interfaz muy intuitiva, lo que permite una rápida adaptación al software y facilita el aprendizaje. A continuación, se explicarán las partes en las que se divide la ventana de construcción del programa.

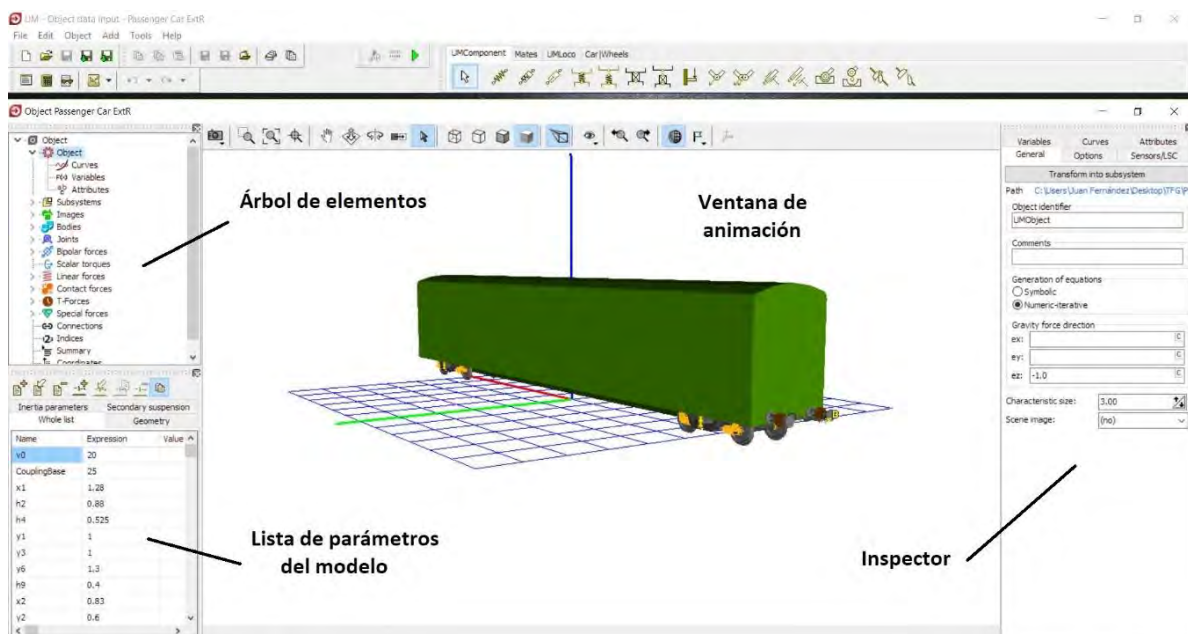


Figura 3.2: Ventana principal de UM Input

Como se puede observar, se distinguen cuatro zonas diferentes en la ventana de construcción. Seguidamente, se procede a explicar brevemente la función de cada una de ellas.

- **Árbol de elementos:** situado en la esquina superior izquierda de la ventana, permite acceder a los diferentes elementos del modelo a analizar.

Dentro del árbol de elementos, se distinguen diferentes categorías, en las cuales se encuentran los elementos agrupados. Para crear un elemento, primero se debe definir los 'Objetos gráficos' (GO), de los que se compone. Esto es simplemente para crear la imagen del elemento que se quiere que se muestre en la ventana de animación. Para crear la imagen de un objeto, se puede precisar del uso de más de una forma de las que nos facilita el programa (box, cone, plate, ellipse, helix...)

Una vez creados los objetos gráficos (GO), procedemos a crear los cuerpos (bodies). Para ello, se selecciona un nuevo cuerpo y se le asigna el GO creado anteriormente.

Además de esto, en el árbol de herramientas se encuentran otros elementos como los son fuerzas lineales, fuerzas bipolares, fuerzas de contacto, fuerzas especiales...

Para este proyecto, las fuerzas bipolares son las que van a tener más importancia, ya que dentro de esta categoría de elementos se encuentran los muelles y amortiguadores.

- **Lista de parámetros del modelo:** situada debajo del árbol de elementos. Dentro de esta sección, se van a mostrar todos los parámetros que hemos definido de los objetos que hemos ido creando. Esta lista lo que hace es facilitarnos el acceso a dichos parámetros ya que si no tendríamos que acceder por medio del árbol de elementos hasta nuestro objeto y modificar el parámetro desde ahí.

Los parámetros que se encuentran en esta lista son masas ('m'), constantes de rigidez y de amortiguación ('k' y 'c'), valores para situar la posición de algún elemento ('x', 'y' y 'z'), valores para la geometría, valores para el tensor de inercia de los elementos...

Además, desde la lista de parámetros, podemos crear otros nuevos o modificar alguno ya existente. También, se pueden crear parámetros simples, en los que simplemente se les asigna un valor numérico o más complejos, los cuales se definen como una función de otros parámetros ya definidos.

- **Inspector de objetos:** situado en la parte derecha de la ventana. Se trata de la herramienta principal para la descripción de los elementos. En el inspector de objetos se muestra toda la información detallada sobre el elemento que se está definiendo en ese momento. En esta sección, se permite introducir directamente el valor de los parámetros de los objetos que componen nuestro modelo.
- **Ventana de animación:** situada en la parte central de la ventana. En ella se muestran el modelo o sus elementos individualmente. Dentro de la ventana de animación se pueden distinguir el plano XY cuadrículado y un eje de coordenadas con los ejes X (rojo), Y(verde) y Z(azul). Esta ventana permite además cambiar el zoom, ajustar la perspectiva, cambiar la orientación, mostrar un elemento como un sólido o solamente las aristas y rotar a nuestro gusto.

Todos estos ajustes se realizan desde la barra de herramientas de la ventana de animación, la cual se encuentra en la parte superior de ésta. [23]

3.2.2 UM SIMULATOR

Este programa se encarga de la resolución y el post-procesado, las dos últimas tareas típicas de los programas CAE. Los objetivos de este programa son los siguientes: la resolución de la integración numérica de las ecuaciones de movimiento junto con la animación del objeto y la creación de los gráficos, el análisis lineal de las ecuaciones de los objetos, proyectos multi-variante y la optimización paramétrica y otras muchas funciones.

UM Simulator es una herramienta que se usa una vez se ha definido el modelo con todas sus variables en el pre-procesado (UM Input) para proceder a su análisis y simulación. También, es posible abrir modelos ya definidos que vienen incluidos en la librería del programa, por lo que no haría falta realizar el primer paso con la herramienta UM Input.

El programa UM Simulator únicamente permite trabajar con un único proyecto al mismo tiempo. Por lo que en cada uno se debe especificar las variables que se quieren analizar y la geometría que va a tener la vía, entre otros parámetros.

A continuación, se analizan brevemente los aspectos y herramientas principales de este programa. Antes de nada, es muy importante familiarizarse con el entorno de UM Simulator.

Cuando se quiere simular un modelo en el programa, aparece una ventana dentro de este, con el nombre de "Animation window", en la cual se muestra la imagen del modelo a simular, como se aprecia en la siguiente figura.

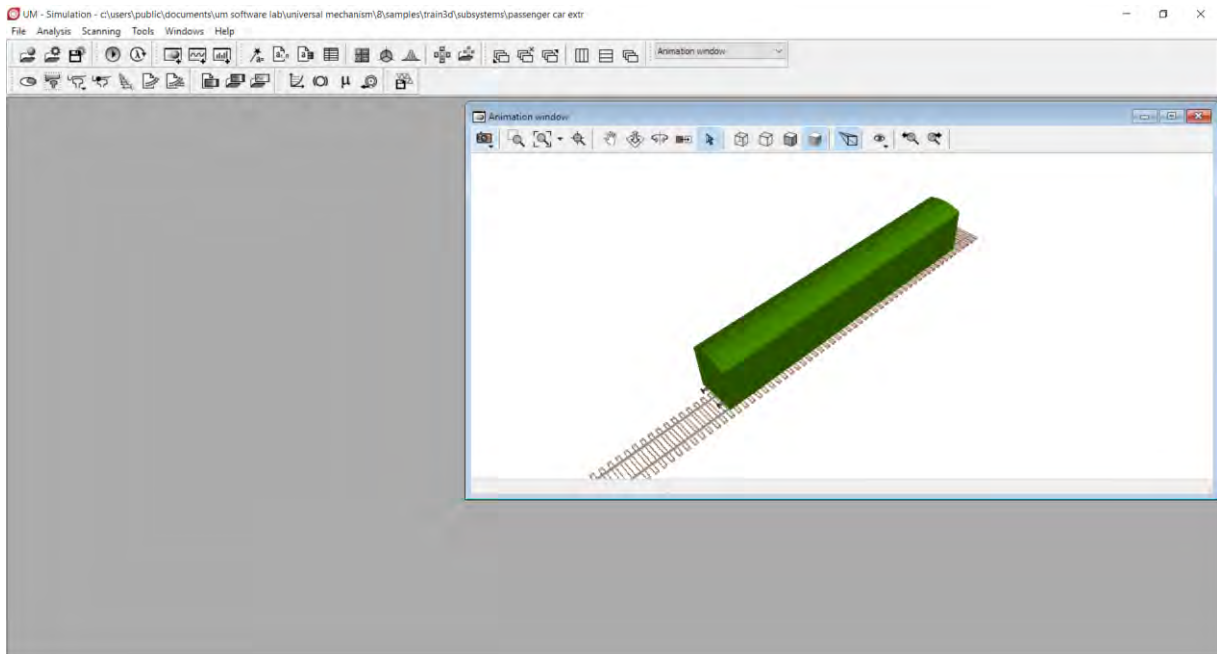


Figura 3.3: Ventana principal de UM Simulator

A continuación, se deben especificar las variables de interés que se van a analizar. Para ello se abre otra ventana donde se encuentran todas las variables disponibles. A esta ventana, llamada "Wizard of variables", se puede acceder mediante "Tools" y seguidamente, "Wizard of variables".

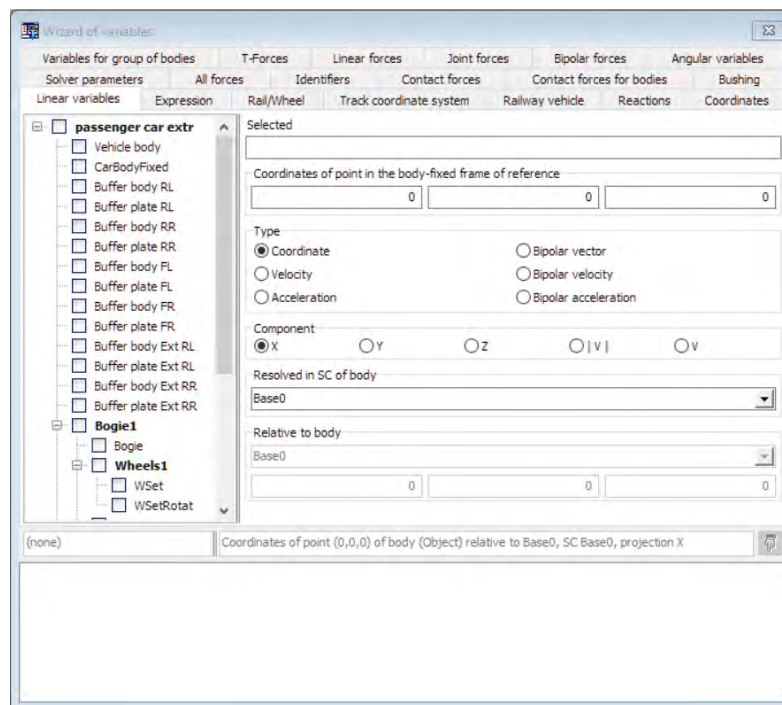


Figura 3.4: Ventana "Wizard of variables"

Una vez en esta ventana, las variables están organizadas por categorías para facilitar la búsqueda de la variable de interés. Para este proyecto, la gran mayoría de variables han sido seleccionadas de la categoría “Bipolar Forces”, donde se encuentran las variables de los elementos relacionadas con la suspensión. A continuación, se muestra una figura de la categoría “Bipolar Forces”.

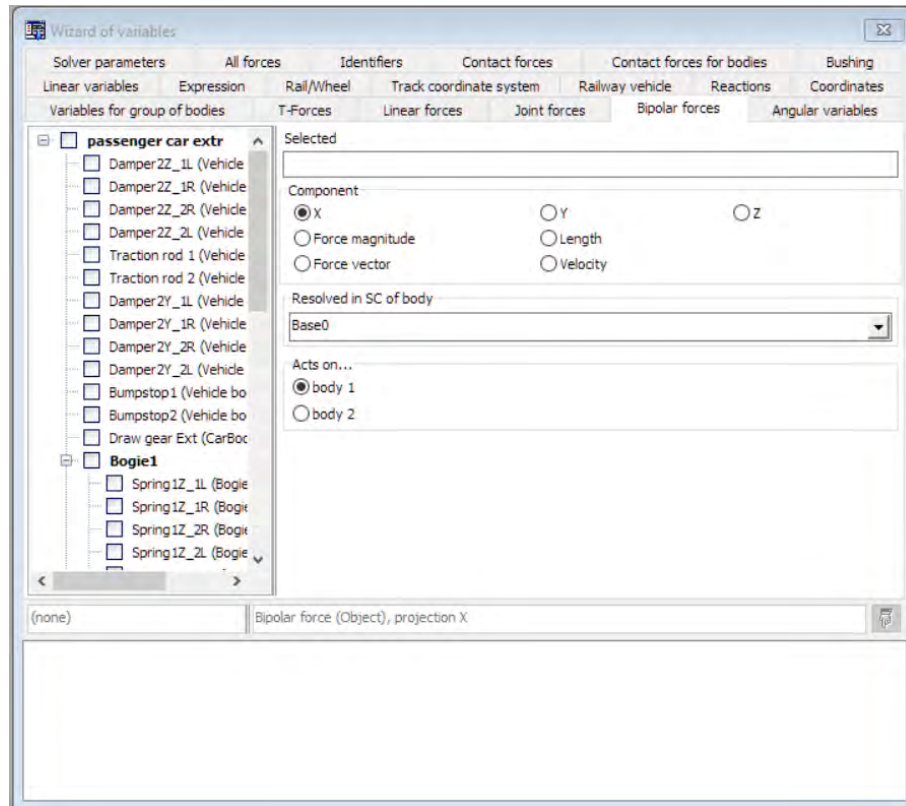


Figura 3.5: Categoría "Bipolar Forces"

En el momento en el que se ha identificado la variable, se abre una nueva ventana dentro del programa para obtener la gráfica que recogerá los cambios en el valor de la variable en cuestión en función del tiempo de simulación o de los metros de vía. Para abrir esta ventana, se puede acceder mediante “Tools” y después “Graphical window”.

Por último, se accede a la ventana de simulación para configurar las condiciones iniciales y comprobar los valores de los parámetros que se han definido anteriormente en el programa UM Input. Además, en esta ventana, se ofrece la posibilidad de elegir el método de resolución (Park, ADM, BDF, Gear 2...) y determinar el tiempo o la distancia de simulación.

Más adelante, en la explicación del módulo UM Loco, se comentarán en profundidad otros parámetros que pueden ser modificados en la simulación, como la geometría de la vía o el método para el análisis del contacto rueda-raíl.

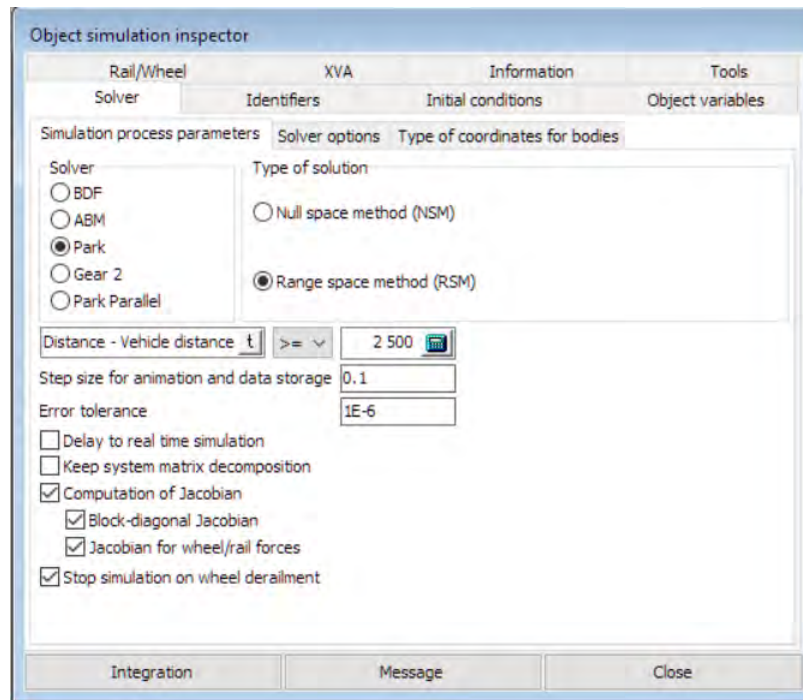


Figura 3.6: Ventana de simulación

Una vez configurados los parámetros, ya se podría comenzar la simulación. Además, se puede realizar un seguimiento del movimiento del modelo desde la ventana “Animation Window” y se obtendrían los resultados una vez finalizada la simulación. En la siguiente figura, se muestra la ventana de UM Simulator una vez a concluido la simulación del modelo.

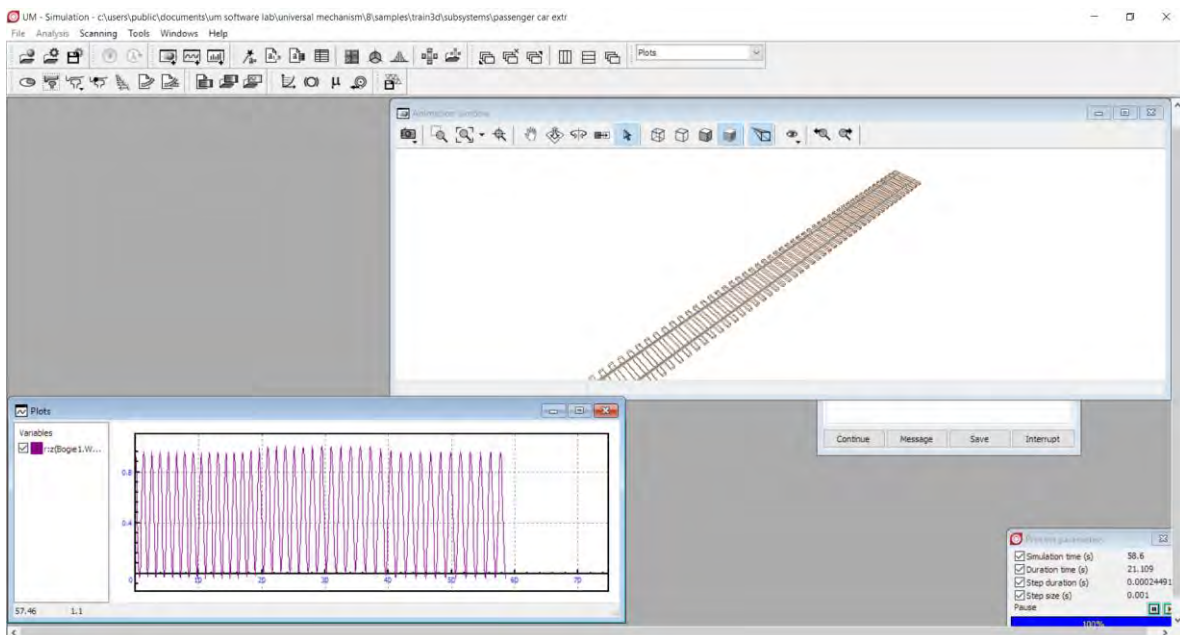


Figura 3.7: Fin de simulación en UM Simulator

3.3 LISTA DE MÓDULOS DE UM

Universal Mechanism está formado por una serie de herramientas y módulos que son los que componen el programa. Estos módulos no funcionan de forma independiente, si no que todos ellos constituyen lo que es el programa en sí, tanto UM Input como UM Simulator.

Dentro del programa, cada módulo aporta sus funciones y características según vayan siendo solicitadas por el usuario. A continuación, se muestra una lista de todos los módulos que se incluyen en Universal Mechanism y la función de cada uno. [23]

- **UM Base:** es la parte más básica y principal del programa. Incluye los pre- y post-procesadores. Además, UM Base cuenta con las siguientes herramientas:
 - **Control Panel:** es la herramienta encargada del control interactivo del modelo.
 - **Training ground:** esta herramienta se usa fundamentalmente para crear terrenos de entrenamiento virtuales, que son usados para vehículos con cadenas y robots.

A continuación, se muestran los demás módulos, los cuales vienen integrados en el módulo base (UM Base), en forma de diferentes pestañas, barras de herramientas u opciones.

- **UM Subsystems:** se trata de un módulo adicional que nos permite describir objetos grandes como subsistemas.
- **UM Automotive:** utilizado generalmente para la simulación de la dinámica en vehículos de carretera.
- **UM Tracked Vehicle:** módulo dedicado exclusivamente a la simulación de la dinámica de vehículos con cadenas.
- **UM Loco:** módulo encargado de simular la dinámica de un sistema ferroviario.
- **UM Experiments:** se utiliza para el escáner paramétrico del comportamiento dinámico y su optimización.
- **UM Cluster:** es el servicio de cálculos distribuidos. Este servicio, amplía el módulo de Experimentos (UM Experiments) para ser utilizado en un clúster de red de computadora local o global para experimentos numéricos paralelos.
- **UM FEM:** se usa para incluir cuerpos elásticos en los modelos.

- **UM Control:** se trata de un módulo que facilita una interfaz para rutinas de Matlab/Simulink y otras definidas por el usuario, de esta forma podemos incluir aspectos de control, electrodinámicos, hidráulicos, etc. en los modelos de UM. Además, UM Control nos proporciona las siguientes herramientas:
 - **Rutinas definidas por el usuario:** esta herramienta nos permite importar a UM modelos de librerías cargadas dinámicamente (DLL), compiladas con la ayuda de algún compilador. Las DLL describen modelos matemáticos de fuerzas o de control.
 - **Matlab Import:** sirve para exportar modelos de Matlab/Simulink a DLL y así importarlos en modelos de UM, que es el programa con el que estamos trabajando.
 - **CoSimulation:** utilizado para importar modelos de UM como S-Functions (System Functions) en modelos de Matlab/Simulink, siendo esta la aplicación en la que se va a trabajar.
 - **UM CAD Interfaces:** herramienta que nos permite importar datos gráficos e inerciales de programas como SolidWorks, Autodesk Inventor, Unigraphics NX, Kompas-3D o Pro\E.
 - **UM Train:** módulo encargado principalmente de la simulación de la dinámica longitudinal de trenes.
 - **UM Train 3D:** nos permite incluir además el modelo en tres dimensiones de un tren en el módulo de ferrocarril de UM Loco.
 - **UM Ballast:** se trata de un módulo cuya función es simular la dinámica de sistemas de medios granulares en dos dimensiones.
 - **UM Rail\Wheel Wear:** herramienta utilizada para predecir el progreso del perfil de las ruedas de un sistema ferroviario a causa del desgaste con el rail.
 - **UM Durability:** módulo encargado del análisis de fatiga S-N (nos relaciona el estrés y el número de ciclos hasta la rotura).
 - **UM 3D Contact:** herramienta que se usa para la simulación en tres dimensiones de la interacción de contacto.
 - **UM COM Server:** facilita la simulación de modelos de UM. Se usa para ayudar a la simulación de modelos en el entorno de Matlab/Simulink.

4 METODOLOGÍA

4.1 ANTECEDENTES

Para la realización del proyecto, se ha partido de unas bases y unas herramientas que han permitido sacar adelante este trabajo. Estas herramientas han hecho que sea posible desarrollar y llevar a cabo las investigaciones y análisis de los parámetros críticos que se han establecido.

A continuación, analizaremos las bases y herramientas de una forma más detalladas. Podemos dividirlo en dos partes: el software de Universal Mechanism y el problema del diseño de la suspensión para un vehículo ferroviario.

4.1.1 PROBLEMA EN EL DISEÑO DE LA SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO FERROVIARIO

Los ferrocarriles son un medio de transporte muy usado hoy en día, tanto para mercancías como para personas. Por tanto, cuando se va a realizar un trayecto en tren, el contenido debe estar seguro. Para el transporte de mercancías basta con que la carga llegue al lugar de destino en buenas condiciones, pero, sin embargo, cuando se trata del transporte de viajeros, además de seguridad, se debe garantizar comodidad durante el trayecto. En este punto, es donde juega un papel muy importante la suspensión de los coches o vagones.

El sistema de suspensión, y en general todo el tren, varía mucho dependiendo del tipo de carga con el que se va a tratar. Para un transporte de mercancías, el sistema de suspensión del ferrocarril será mucho más robusto, puesto que la carga transportada puede ser muy pesada, y más rígido que para el transporte de viajeros, ya que la comodidad y el confort de la mercancía no es el factor más importante. Por el contrario, cuando se trata del transporte de personas, el confort y la comodidad es un aspecto fundamental, ya que se debe garantizar un trayecto agradable. Por tanto, la suspensión para un tren de viajeros debe ser diseñada de forma diferente que uno para el transporte de mercancías.

Es por todo esto, que el problema del diseño de la suspensión es un factor crucial. Como ya hemos visto en el capítulo 2, “Conceptos teóricos”, el sistema de suspensión de un ferrocarril se divide en dos etapas generalmente, la suspensión primaria y la suspensión

secundaria. Es en esta última en la que nos hemos centrado, ya que, aun siendo la suspensión primaria también fundamental para garantizar la comodidad del trayecto, es la suspensión secundaria la que influye de forma más directa, ya que conecta el bastidor del bogie con la caja, donde se encuentran los pasajeros.

Una vez explicada la importancia de la suspensión secundaria en los ferrocarriles, se ha decidido profundizar en este tema y estudiar más en detalle su comportamiento. Ahora, se necesita una herramienta con la capacidad de llevar a cabo los experimentos planificados.

4.1.2 EL SOFTWARE: “UNIVERSAL MECHANISM”

Una vez que planteado el problema que se va a analizar, se deben elegir las herramientas adecuadas para llevar los análisis e investigaciones a cabo. Para ello, se precisa de la ayuda de un software capaz simular vehículos ferroviarios y que además proporcione información detallada sobre los parámetros críticos que van a analizarse.

Por tanto, tras estudiar la viabilidad de varios programas para la simulación de vehículos ferroviarios que permitan realizar los experimentos planificados, se optó por un software de origen ruso, “*Universal Mechanism*”. Se trata de un software muy potente, que permite modificar casi cualquier parámetro de un vehículo ferroviario. Toda la información relativa a este software se encuentra recogida de forma más detallada en el capítulo 3 del proyecto, “*Descripción de la herramienta*”.

Después de un proceso de adaptación al entorno del programa y comprobar todo su potencial, se procedió al estudio de los experimentos que se iban a llevar a cabo para obtener un resultado y unas conclusiones que nos acerquen a la solución del problema planteado en el apartado anterior, el diseño del sistema de suspensión de un vehículo ferroviario.

4.2 PLANIFICACIÓN

Una vez explicados los conceptos básicos y la herramienta usada para la realización de este proyecto, es importante mencionar las diferentes fases que han compuesto este trabajo, y que han sido necesarias para conseguir los objetivos planteados inicialmente. A continuación, se muestra la planificación y las fases en orden cronológico, que han servido de guía para la realización del proyecto.

Fase 1: Planteamiento y elección del proyecto.

En esta primera fase, se reúnen alumno y tutor y se discute sobre cómo se debería enfocar el proyecto y que parámetros críticos son interesantes para analizar. Dentro de las opciones disponibles se encontraban el estudio dinámico del contacto rueda-carril y el análisis de la suspensión de un vehículo ferroviario. Finalmente, se optó por la segunda alternativa y se tomó la decisión de analizar concretamente cómo varía la longitud de los amortiguadores de la suspensión secundaria en el paso por curvas de diferente radio en diferentes condiciones. Una vez definido el proyecto, se concretan los objetivos del proyecto, así como el alcance de los mismos, y la metodología a seguir para su realización.

Fase 2: Investigación, documentación y primera toma de contacto con el software.

Durante esta fase, las actividades principales fueron la documentación y la toma de contacto con el entorno del software “Universal Mechanism”. Durante la actividad de documentación, se dedicó la mayor parte del tiempo a la búsqueda de libros y documentos relacionados con la dinámica de un sistema ferroviario, con el fin del mejor entendimiento de la función de la suspensión de un vehículo ferroviario, así como sus características, tipo y componentes de los que está formada. Por otro lado, para la toma de contacto con el software, se procedió a la realización de los tutoriales proporcionados por el propio software, con el objetivo de familiarizarse con el entorno del programa. También fueron de gran ayuda los manuales de usuario que incluye el software.

Fase 3: Estudio en profundidad de la información elegida.

Una vez seleccionadas las fuentes más interesantes y con los contenidos más completos, se procede al estudio en detalle de éstos. Los contenidos seleccionados para este proyecto se recogen en el capítulo 2, “Conceptos Teóricos”, que incluye el estudio de la vía como estructura, la suspensión de un vehículo ferroviario y una pequeña introducción sobre la

viscoelasticidad. Todos estos conceptos son clave para el entendimiento y la interpretación de los datos obtenidos posteriormente en las simulaciones.

Fase 4: Definición de los experimentos a estudiar.

A continuación, se decidió en qué situaciones se iba a estudiar el comportamiento de la suspensión secundaria. Finalmente, se llegó a la conclusión de que se debían realizar tres experimentos diferentes que nos proporcionarían una idea bastante fiable sobre el comportamiento de la suspensión. A continuación, se explican brevemente en que consiste cada uno de los experimentos que se han llevado a cabo en el proyecto.

- **Experimento 1: Estudio de la variación de la longitud de la suspensión secundaria hasta la velocidad de descarrilamiento.**

El primer experimento consiste en el estudio de la variación de la longitud de la suspensión secundaria, pero en este caso, se ha estudiado para un rango de velocidades que van desde 5m/s hasta la velocidad de descarrilamiento, escalando en intervalos de 5 m/s. El experimento se ha realizado para las curvas de 1, 2 y 5 km de radio.

- **Experimento 2: Estudio de la variación de la longitud de la suspensión secundaria modificando el valor de las constantes de rigidez y amortiguación.**

Este segundo experimento, trata del estudio de la variación de longitud, pero esta vez modificando, en intervalos del 20% con respecto al valor por defecto, las constantes de rigidez y de amortiguación de todos los componentes de la suspensión secundaria. Esto significa dicho coloquialmente, hacer la suspensión más dura o más blanda. Este experimento se ha llevado a cabo en curvas de 1, 2 y 5 km de radio y para una velocidad genérica de 40 m/s para su estudio en detalle. Pero, además, se han obtenido los valores de la velocidad crítica para cada una de las curvas y para cada valor de las constantes de rigidez y amortiguación.

- **Experimento 3: Estudio de la variación de la longitud de la suspensión secundaria modificando la posición del centro de masas del coche.**

En este experimento, se estudia la variación de la longitud de los amortiguadores de la suspensión secundaria, cuánto se comprime o alarga, según vamos modificando la posición del centro de masas a lo largo de tres direcciones diferentes. Este experimento está realizado para curvas de 1, 2 y 5 km de radio y para una velocidad genérica establecida, cuyo valor ese de 40 m/s, que equivale a 144km/h.

Fase 5: Realización de las simulaciones y obtención de resultados.

Una vez establecidos los experimentos a realizar, se procede a la simulación de los modelos correspondientes. Para ello, primero debemos modificar el modelo predeterminado que nos proporciona “Universal Mechanism”. Como hemos mencionado anteriormente en los experimentos, debemos modificar la posición del centro de masas y los valores de las constantes de rigidez y amortiguación. Una vez realizadas las modificaciones oportunas, se crea un proyecto en UM estableciendo los parámetros que queremos analizar y comienza la simulación. Cuando la simulación finaliza, el software nos proporciona los resultados en forma de gráficos.

Fase 6: Procesado e interpretación de los resultados.

En esta fase se comprueba que los resultados obtenidos son coherentes y se corresponden con la realidad. Una vez que los resultados han sido verificados, se procede a su interpretación y procesado en forma de tablas de Excel. Con estas tablas, se crearán otros gráficos que proporcionarán los resultados y conclusiones finales de los experimentos.

Fase 7: Redacción de la memoria del proyecto.

Por último, con toda la información ya recopilada de bases de datos, libros y manuales, y con los resultados finales ya procesados e interpretados, se procede a la organización de la información y a la redacción de la memoria de proyecto. Una vez finalizada la memoria, se revisa en busca de errores y fallos. Finalmente, se elabora la presentación con los aspectos más relevantes del proyecto.

A continuación, se muestra un diagrama de bloque a modo de resumen, que contiene las fases del proyecto que se han presentado en este apartado.

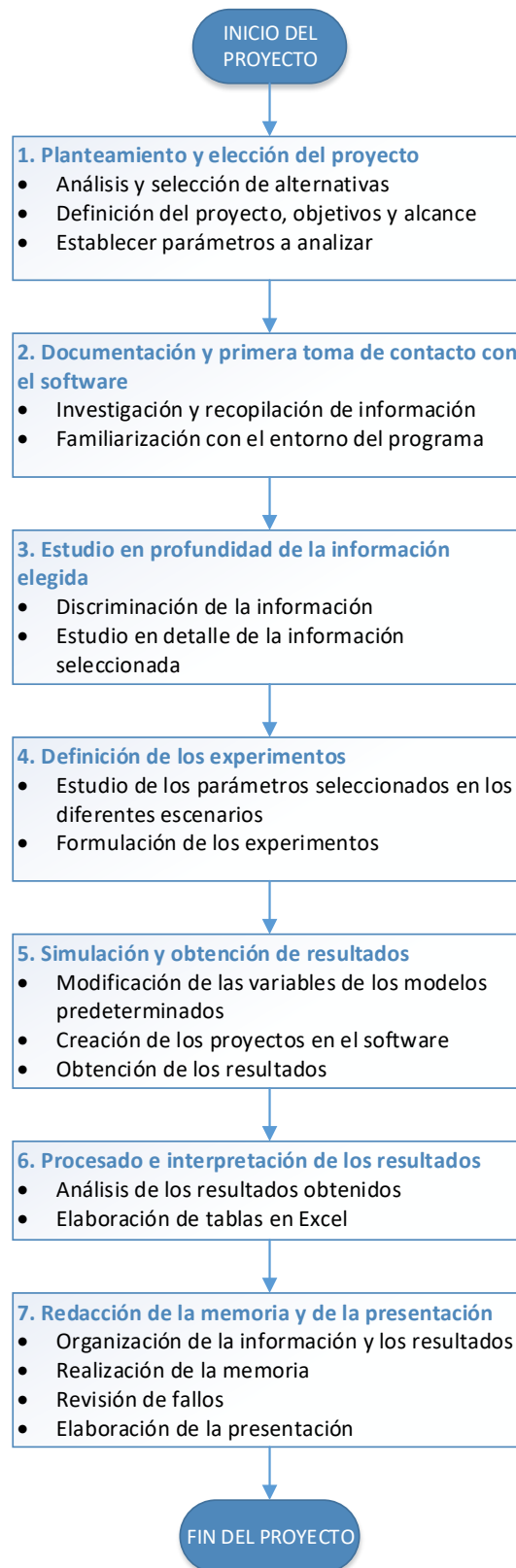


Figura 4.1: Diagrama de bloques del proyecto

4.3 NORMATIVA APLICABLE

La normalización tiene como objetivo la elaboración de una serie de especificaciones técnicas, llamadas normas, que son utilizadas por las organizaciones, de forma totalmente voluntaria, como garantía para probar la calidad y seguridad de sus actividades y productos. Además, la normalización contribuye a la mejora de la productividad, la competitividad y al crecimiento económico.

Las normas son documentos de aplicación voluntaria que contienen un conjunto de especificaciones técnicas que están basadas en los resultados de la experiencia y el desarrollo tecnológico. Las normas están elaboradas en Comités Técnicos de Normalización (CTN) gestionados por los servicios técnicos de la UNE, que es el único organismo de normalización en España. [24]

En lo que se refiere al sector ferroviario, las normas son elaboradas por el CTN-25 de Aplicaciones Ferroviarias, y según AENOR, organización encargada del desarrollo y difusión de las normas UNE, cuenta con 299 normas aplicables a este sector.

A continuación, se muestran algunas de las normas más relevantes relacionadas con el tema tratado en el presente proyecto, la suspensión ferroviaria.

- UNE-EN 14817:2007; Aplicaciones ferroviarias. Componentes de suspensión. Elementos de control de muelle neumático. [25]
- UNE-EN 15049:2008; Aplicaciones ferroviarias. Elementos de suspensión. Barra de torsión, en acero. [26]
- UNE-EN 13802:2014; Aplicaciones ferroviarias. Componentes de suspensión. Amortiguadores hidráulicos. [27]
- UNE-EN 13298:2004; Aplicaciones ferroviarias. Elementos de suspensión. Muelles helicoidales de suspensión, de acero. [28]
- UNE-EN 13597:2004; Aplicaciones ferroviarias. Componentes de suspensión de caucho. Membranas de caucho para muelles de suspensión neumática. [29]
- UNE-EN 13913:2004; Aplicaciones ferroviarias. Componentes de suspensión de caucho. Piezas mecánicas a base de elastómeros. [30]
- UNE-EN 14200:2005; Aplicaciones ferroviarias. Elementos de suspensión. Resortes de ballesta de acero. [31]
- UNE 25204:1978; Muelles para suspensión de doble anilla tipo ore. [32]

- UNE 25205:1976; Bulón de la suspensión de los vagones tipo ore. [33]
- UNE-EN 12299:2010; Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los pasajeros. Medición y evaluación. [34]

Además, debemos mencionar que la Comisión de la Unión Europea, ante la necesidad de afrontar el problema económico y el descenso de tráfico en el sector ferroviario en Europa, presentó en 1990 la comunicación de un documento titulado “Política Ferroviaria Europea”.

Este documento recoge las propuestas que han sido desarrolladas en varias directivas, que se agrupan en los conocidos “Paquetes Ferroviarios”, que además han sido ampliados por otras normas y proposiciones.

Actualmente, se han propuesto tres paquetes ferroviarios, de los cuales los dos primero han sido aprobados, y el tercero que fue presentado en 2004, se encuentra en fase de discusión y todavía no ha sido aprobado. Con la aprobación de este tercer paquete se pretende completar la liberalización y la regulación del sector ferroviario. [35]

Hoy en día las directivas generales en materia de interoperabilidad en la Unión Europea, son las siguientes.

- Directiva 2016/797/UE de 11 de mayo de 2016, sobre la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Unión Europea. (versión refundida)
- Directiva 2008/57/CE de 17 de junio, sobre la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Comunidad
- Directiva 2009/131/CE de 16 de octubre, que modifica el anexo VII de la Directiva 2008/57/CE.
- Directiva 2011/18/UE de 1 de marzo de 2011, por la que se modifican los anexos II, V y VI de la Directiva 2008/57/CE.
- Directiva 2013/9/UE de 11 de marzo, que modifica el anexo III de la Directiva 2008/57/CE.
- Directiva 2014/38/UE de 10 de marzo, por la que se modifica el anexo III de la Directiva 2008/57/CE en lo relativo a la contaminación acústica.
- Directiva 2014/106/UE de 5 de diciembre, por la que se modifica los anexos V y VI de la Directiva 2008/57/CE. [36]

Por otro lado, las directivas relativas a la interoperabilidad a nivel nacional son las que se muestran a continuación.

- Real Decreto 1434/2010 de 5 de noviembre, sobre interoperabilidad del sistema ferroviario de la Red Ferroviaria de interés general.
- Orden FOM/3218/2011 de 7 de noviembre, por la que se modifican los anexos II, V y VI del Real Decreto 1434/2010.
- Orden FOM/421/2014 de 13 de marzo, por la que se modifica el anexo III del Real Decreto 1434/2010.
- Orden FOM/22/2015 de 19 de enero, por la que se modifica el anexo III del Real Decreto 1434/2010, de 5 de noviembre, sobre interoperabilidad del sistema ferroviario de la Red Ferroviaria de interés general.
- Orden FOM/167/2015 de 6 de febrero, por la que se regulan las condiciones para la entrada en servicio de subsistemas de carácter estructural, líneas y vehículos ferroviarios.
- Orden FOM/2437/2015 de 13 de noviembre, por la que se modifican los anexos I, V y VI del Real Decreto 1434/2010, de 5 de noviembre, sobre interoperabilidad del sistema ferroviario de la Red Ferroviaria de interés general. [37]

4.4 RESULTADOS ESPERADOS

En este apartado se recogen unas breves deducciones de lo que suponemos serán finalmente los resultados a nuestros experimentos.

- En primer lugar, se espera que los resultados obtenidos del programa de simulación sean coherentes y fieles a lo que ocurre en la realidad a pesar de haber usado un modelo totalmente parametrizado de un vehículo convencional de pasajeros.
- Se pretende analizar la influencia de la velocidad del vehículo frente a la variación de longitud del amortiguador a su paso por curva. Se espera que cuanto mayor sea la velocidad, mayor sea la compresión o alargamiento de los amortiguadores para las ruedas exteriores e interiores respectivamente.
- La variación de longitud de los amortiguadores y la velocidad crítica dependiendo del radio de la curva por la que se vaya a circular. En principio, cuanto mayor es el radio de la curva, más amplia será esta y mayor será velocidades de circulación máxima. Para el caso de los amortiguadores, cuanto mayor sea el radio de la curva, menor será la variación de la longitud para una misma velocidad.
- Si se modifica el centro de gravedad del coche en cualquiera de los tres ejes, supondrá una mayor inestabilidad en el paso por curva y probablemente provoque un descarrilamiento o vuelco antes de lo previsto.
- Cuando se produce un cambio en la rigidez de la suspensión, el comportamiento de ésta será diferente para cada caso. En un principio, nuestra primera hipótesis es que cuanto mayor sea el valor de la rigidez de la suspensión, a mayores velocidades podrá circular el vehículo a su paso por curva.

Como se ha comentado anteriormente, esto son deducciones e hipótesis previas al análisis de los parámetros de interés. Una vez obtenidos los resultados definitivos, se elaborarán las conclusiones que reafirmaran o rechazaran los resultados esperados previamente mostrados.

5 DESARROLLO DEL PROYECTO Y RESULTADOS

A lo largo de este capítulo, se van a exponer los experimentos que hemos realizado para tratar el problema del diseño de la suspensión en un vehículo ferroviario, junto con los resultados obtenidos del programa de simulación. Además, se mostrarán gráficos y tablas elaboradas con MS-Excel con los datos que se han extraído de los resultados proporcionados por el programa, con la finalidad de que se muestren con una mayor claridad y facilite el trabajo a la hora de interpretarlos y extraer conclusiones a partir de ellos.

Sin embargo, antes de pasar a la explicación detallada de cada experimento, se comienza describiendo la geometría y parámetros de la vía y el modelo de vehículo ferroviario que se ha utilizado para desarrollar el proyecto.

5.1 GEOMETRÍA DE LA VÍA

Para comenzar, se describirá brevemente la vía sobre la que se han llevado a cabo los experimentos.

En lo que se refiere a la geometría, se barajaron las opciones de realizar experimentos en una vía en línea recta, o circulando por una curva de 90° . Después de hacer algunas pruebas y simulaciones, se tomó la decisión de que se obtendría un análisis mucho más completo e interesante si se analizábamos la suspensión de vehículo a su paso por curva. Por tanto, se procedió a diseñar el trazado para crear una curva de 90° .

Dentro del software de simulación, debemos establecer algunos parámetros para crear nuestra curva, como por ejemplo la longitud inicial, el radio de la curva o el peralte. A continuación, se muestra una imagen con los parámetros que se deben introducir.

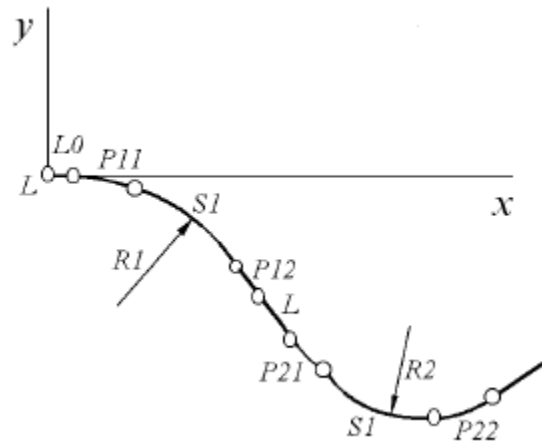


Figura 5.1: Macrogeometría de una curva en S. [38]

Los parámetros que se van a establecer son los siguientes:

- $L1$: se corresponde con la longitud de la sección recta antes de entrar a la curva.
- $P11$: es la longitud de la primera transición de la curva (a la entrada de la curva). Decir también, que este parámetro se conoce también como curva de transición. El objetivo de este arco de circunferencia es el conectar un tramo recto con uno curvo, para evitar así valores críticos de fuerza centrífuga.
- $S1$: se trata de la longitud de la curva.
- $R1$: valor del radio de la curva.
- $H1$: indica el valor del peralte para el carril exterior.
- $P12$: longitud del tramo de la segunda transición de la curva (a la salida de la curva).
- $dY1$: longitud adicional de la vía a su paso por curva.
- $L2$: tramo recto que se encuentra después de realizar la primera curva y antes de tomar la segunda, en caso de que hubiera. [38]

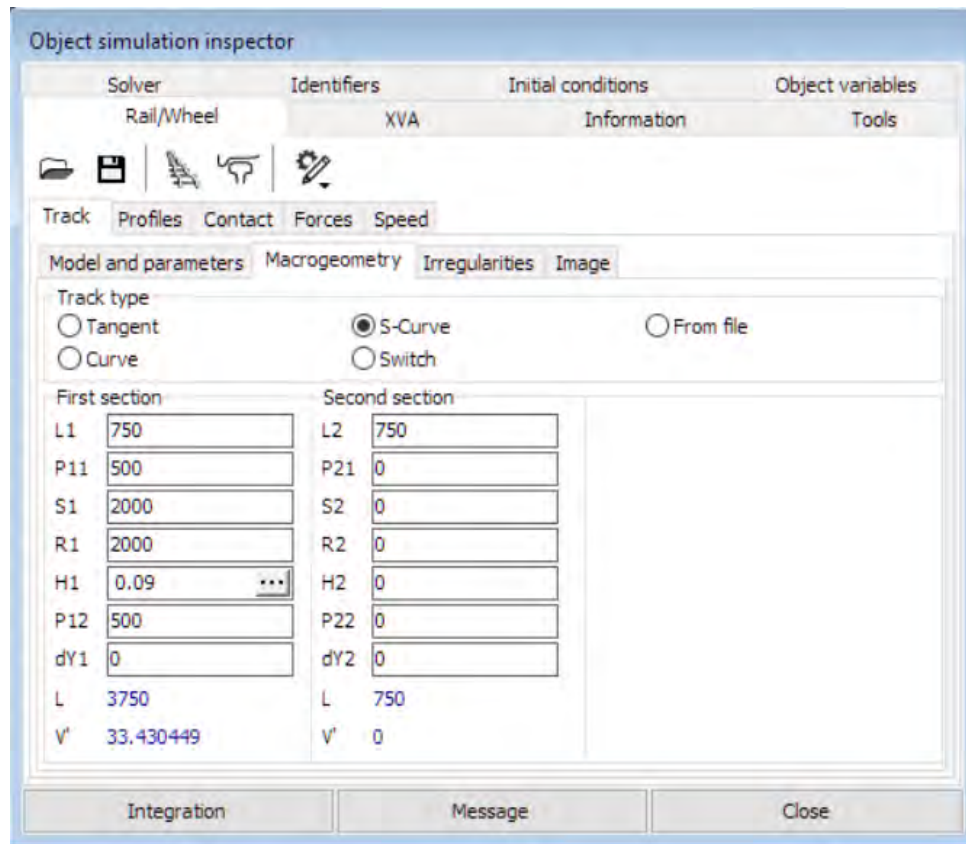


Figura 5.2: Parámetros para una curva de 2km de radio.

Para poder comparar los resultados y obtener una idea más completa del comportamiento de la suspensión de un vehículo ferroviario, se ha realizado el experimento en curvas de diferentes radios, concretamente, en curvas de 1, 2 y 5 km.

Antes de mostrar los datos introducidos para el trazado de cada una de las curvas, se van a comentar algunas suposiciones que se han tomado para diseñar estas curvas. Para empezar, se ha establecido el valor del incremento del ancho de curva, $dY1$, como nulo. Además, por otro lado, hemos considerado el valor del peralte 0.09, valor recomendado por el programa.

Por lo general, los valores introducidos para cada curva han sido introducidos obedeciendo las expresiones que se muestran en la siguiente imagen. Sin embargo, los valores de $L1$ y $L2$, se han ido modificando en función del experimento que se estaba realizando para dar tiempo suficiente para que la suspensión se estabilizase. Más adelante, en cada experimento se especificarán los valores introducidos para cada una de las tres curvas.

$$S1 = R1$$

$$P11 = P12 = \frac{R1}{4}$$

Figura 5.3: Expresiones para establecer los parámetros de la curva.

En cuanto al tipo de vía que se ha usado, hemos optado por la opción que nos sugiere el programa por defecto.

Por un lado, se han utilizado unos carriles tipo R65, fabricado de acuerdo con la norma EN 13674-1:2011, para vías con una anchura de 1520mm y una carga máxima por eje de 250kN. La longitud de cada rail es de 25 metros. [39]

Este tipo de carriles se ha obtenido directamente de la librería de “Universal Mechanism”, concretamente del directorio: C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\8\rw\prfr65new.rpf

Por otro lado, para las traviesas, se ha usado el modelo que el programa trae por defecto.

A continuación, se muestran las tablas que recogen la información de las dimensiones de ambos elementos, carriles y traviesas.

Parámetros raíl R65 (mm)	
Altura	180
Área de la cabeza	75
Altura del alma	105
Anchura del alma	18
Anchura del patín	150
Altura del patín	11.2

Tabla 5.1: Parámetros raíl R65. [39]

Parámetros traviesas (mm)	
Longitud	2750
Anchura	250
Altura	165
Paso	600

Tabla 5.2: Parámetros traviesa.

A continuación, se muestra el resultado del trazado de la vía que resultaría al aplicar todos los parámetros que se han visto en este apartado.

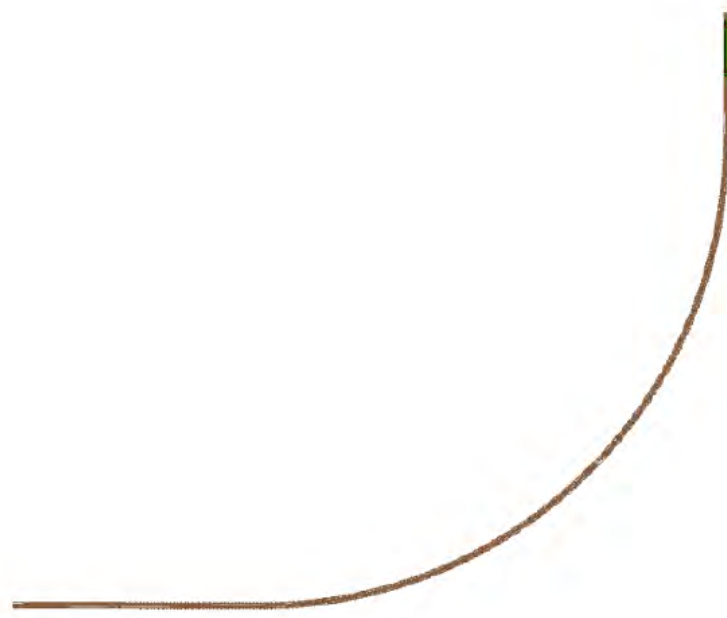


Figura 5.4: Geometría de la curva de 90°. [14]

5.2 MODELO DEL VEHÍCULO DE TRABAJO

Después de escoger el programa de simulación para nuestros experimentos, y establecer el trazado de la curva por la que va a circular nuestro vehículo, falta elegir el modelo de vehículo ferroviario con el que vamos a trabajar.

Tras barajar las posibilidades de estudiar un vehículo de mercancías o uno de pasajeros, nos decantamos por éste último, ya que el modelo que nos proporciona el programa nos pareció el más adecuado y su sistema de suspensión no era tan complejo. Por tanto, vamos a trabajar con un coche de pasajeros que se encuentra en el siguiente directorio de la librería de “Universal Mechanism”: C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\8\SAMPLES\Train3D\Subsystems\Passenger Car ExtR.

El modelo llamado “*Passenger Car ExtR*”, está basado en el modelo ‘*Manchester benchmark*’. La palabra *benchmark*, se puede traducir del inglés como ‘comparativa’ o ‘medida de calidad’. Por otro lado, la Universidad Metropolitana de Manchester, estableció en 1997, una serie de modelos *benchmark* desarrollados para la simulación dinámica de vehículos ferroviarios. El objetivo de estos modelos era ofrecer a los diseñadores de suspensiones y a los investigadores del comportamiento dinámico de esta clase de vehículos, un conjunto de datos que les permitiera calibrar la validez de las técnicas y aproximaciones realizadas. [40]

Los vehículos *benchmark*, representan casos típicos de vehículos, y es muy común que sean utilizados para tareas de modelado.

El vehículo con el que nosotros vamos a trabajar, es un coche general de pasajeros con dos bogies y una suspensión primaria simples. Además, debemos considerar todos los sólidos como rígidos. Por otro lado, al ser un vehículo articulado con suspensión de material articulado, debemos distinguir entre suspensión primaria y suspensión secundaria. A continuación, se muestra una imagen del modelo.

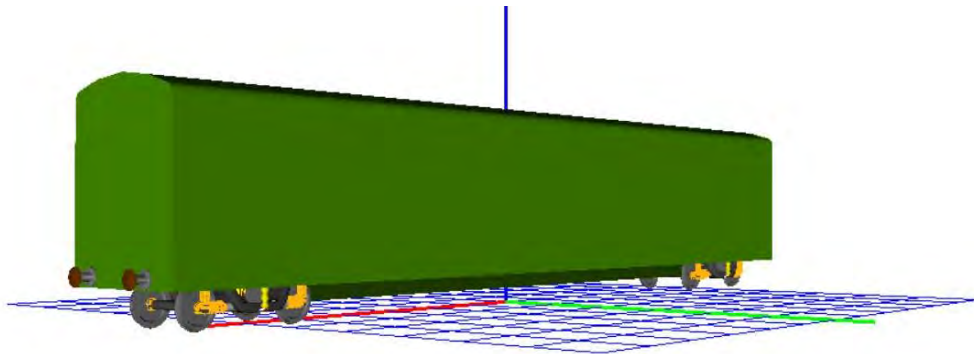


Figura 5.5: Modelo 'Passenger Car ExtR' de Universal Mechanism.

El modelo del vehículo con el que vamos a trabajar, está compuesto por la caja, dos bogies y cuatro conjuntos de ruedas o wheelsets. Seguidamente, se muestra una imagen a modo de esquema de las partes de las que se compone nuestro modelo.

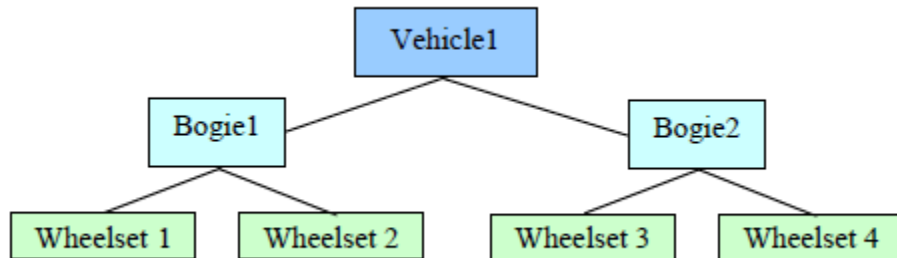


Figura 5.6: Esquema de componentes de 'Passenger Car ExtR'. [41]

Los bogies del vehículo se denominan 'de tipo góndola', debido a que su vista de perfil tiene parecido a dicha embarcación. Dentro del bogie, distinguimos claramente dos wheelsets (conjuntos de ruedas), el cuerpo del bogie o 'frame' y la suspensión primaria. Además, aunque no se hayan representado, se ha de tener en cuenta las cajas de grasa, que unen el bogie con los wheelsets.

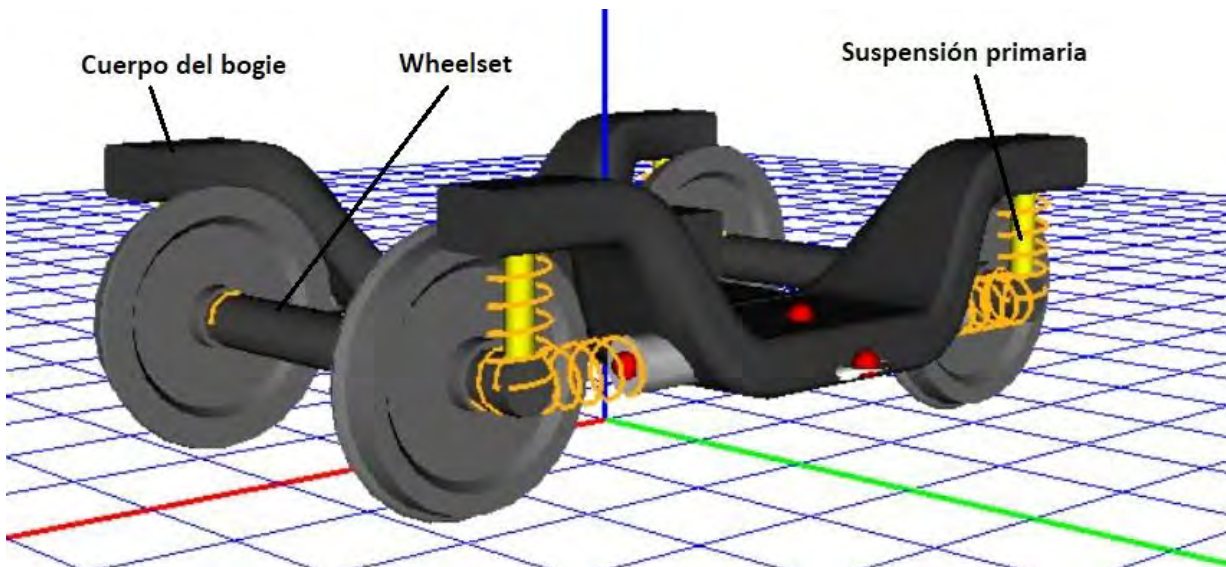


Figura 5.7: Vista completa del bogie.

En lo que se refiere a la masa de sus componentes, los valores han sido establecidos de acuerdo al modelo *'Manchester benchmark'*. Dichos valores se muestran en la siguiente tabla.

Masas de los componentes del vehículo			
Componente	Cantidad	Masa por unidad (kg)	Masa total (kg)
Wheelset	4	1813	7252
Bogie	2	2615	5230
Caja	1	32000	32000
Caja de grasa	8	100	800
Masa del vehículo (kg)			45282

Tabla 5.3: Masas de los componentes del vehículo.

A continuación, se mostrarán los diferentes componentes tanto de la suspensión secundaria como de la primaria junto con su función. Como hemos comentado al principio del apartado, todos los parámetros de las constantes de rigidez y las de amortiguación vienen establecidos según el modelo de *'Manchester benchmark'*. Más adelante, durante los experimentos, profundizaremos en este tema y veremos cómo influye el valor de estas constantes en el comportamiento dinámico del vehículo.

SUSPENSIÓN PRIMARIA POR BOGIE		SUSPENSIÓN SECUNDARIA DEL VEHÍCULO	
Nombre	Función	Nombre	Función
Spring1Z_1L Spring1Z_1R Spring1Z_2L Spring1Z_2R	Rigidez vertical	Spring2_1L Spring2_1R Spring2_2L Spring2_2R	Rigidez verticales
Spring1X_1L Spring1X_1R Spring1X_2L Spring1X_2R	Rigidez longitudinal	Rollbar_1 Rollbar_2	Barra estabilizadora
		Damper2Z_1L Damper2Z_1R Damper2Z_2L Damper2Z_2R	Amortiguación vertical
Spring1Y_1L Spring1Y_1R Spring1Y_2L Spring1Y_2R	Rigidez lateral	Damper2Y_1L Damper2Y_1R Damper2Y_2L Damper2Y_2R	Amortiguación lateral
Damper1Z_1L Damper1Z_1R Damper1Z_2L Damper1Z_2R	Amortiguación vertical	Traction rod 1 Traction rod 2	Barras de tracción
		Bumpstop1 Bumpstop2	Bumpstop (tope de goma)

Tabla 5.4: Componentes suspensión primaria y secundaria del modelo. [41]

También, se debe tener en cuenta que nuestro modelo está compuesto por sistemas muelle-amortiguador para las suspensiones primaria y secundaria, y, además, estos sistemas pueden moverse en dirección vertical, longitudinal y lateral.

Como se ha podido observar en las tablas, los componentes que se han mostrado para la suspensión primaria, son los que incluyen un solo bogie. Sin embargo, los componentes que se muestran en la tabla de la suspensión secundaria, son lo que incluyen el vehículo completo. A continuación, explicaremos con un ejemplo el significado de la nomenclatura utilizada para definir los componentes de la suspensión primaria y secundaria.

- **Nomenclatura suspensión primaria:** Ejemplo: *Spring1Z_1L*.

- Nombre del componente: el nombre del componente viene indicado en la primera palabra. En este caso: *Spring1Z*.
- Ubicación del componente dentro del bogie: para ubicación del componente debemos distinguir entre el wheelset delantero o trasero y entre la parte derecha o izquierda del wheelset. Esta información viene indicada después del guion bajo(_XX). En la siguiente tabla se indica el significado:

Nomenclatura suspensión primaria	
Nombre	Significado
1L	Wheelset delantero y parte izquierda
2L	Wheelset trasero y parte izquierda
1R	Wheelset delantero y parte derecha
2R	Wheelset trasero y parte derecha

Tabla 5.5: Nomenclatura suspensión primaria.

Por tanto, en nuestro caso, el componente está ubicado en el wheelset delantero y en la parte izquierda.

- **Nomenclatura suspensión secundaria:** Ejemplo: *Damper2Z_2R*.

- Nombre del componente: el nombre del componente viene indicado en la primera palabra. En este caso: *Damper2Z*.
- Ubicación del componente dentro del vehículo: para ubicación del componente debemos distinguir entre el bogie delantero o trasero y entre la parte derecha o izquierda del bogie. Esta información viene indicada después del guion bajo (_XX). En la siguiente tabla se indica el significado:

Nomenclatura suspensión secundaria	
Nombre	Significado
1L	Bogie delantero y parte izquierda
2L	Bogie trasero y parte izquierda
1R	Bogie delantero y parte derecha
2R	Bogie trasero y parte derecha

Tabla 5.6: Nomenclatura suspensión secundaria.

Por tanto, en este caso, el componente se encuentra en el bogie trasero y parte derecha.

Seguidamente, se expondrán capturas de los componentes del sistema de suspensión indicando la ubicación de cada uno, con el fin de mostrar de forma más clara la geometría y la disposición de cada uno.

Comenzamos por la suspensión primaria, donde se distinguen cuatro tipos de componentes.

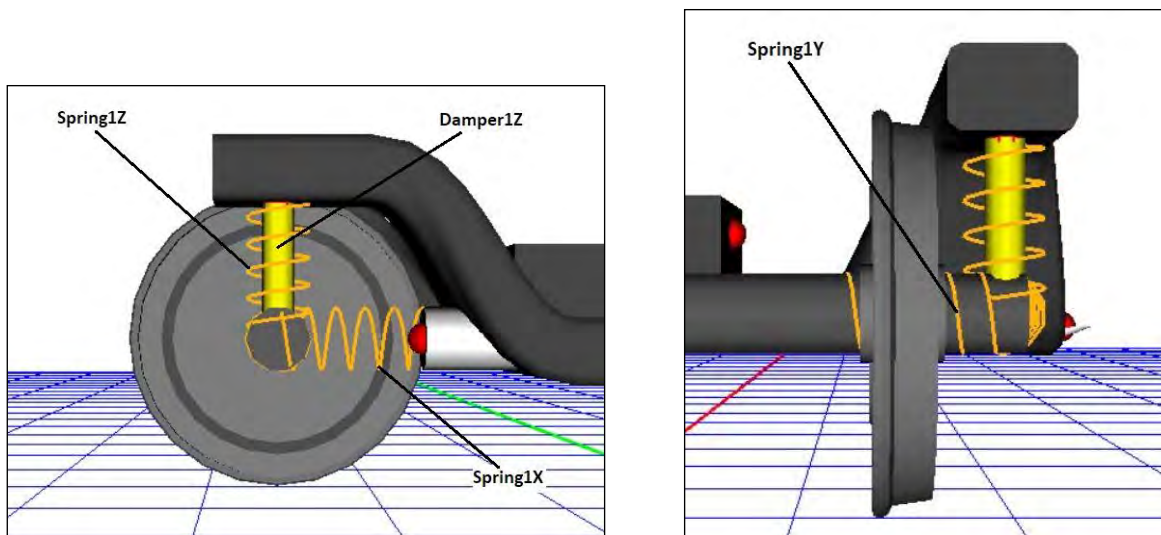


Figura 5.8: Componentes suspensión primaria.

A continuación, se mostrarán los elementos que componen la suspensión secundaria, en la que distinguimos cinco diferentes. Para una visión más clara de los componentes, se ha ocultado la caja del vehículo.

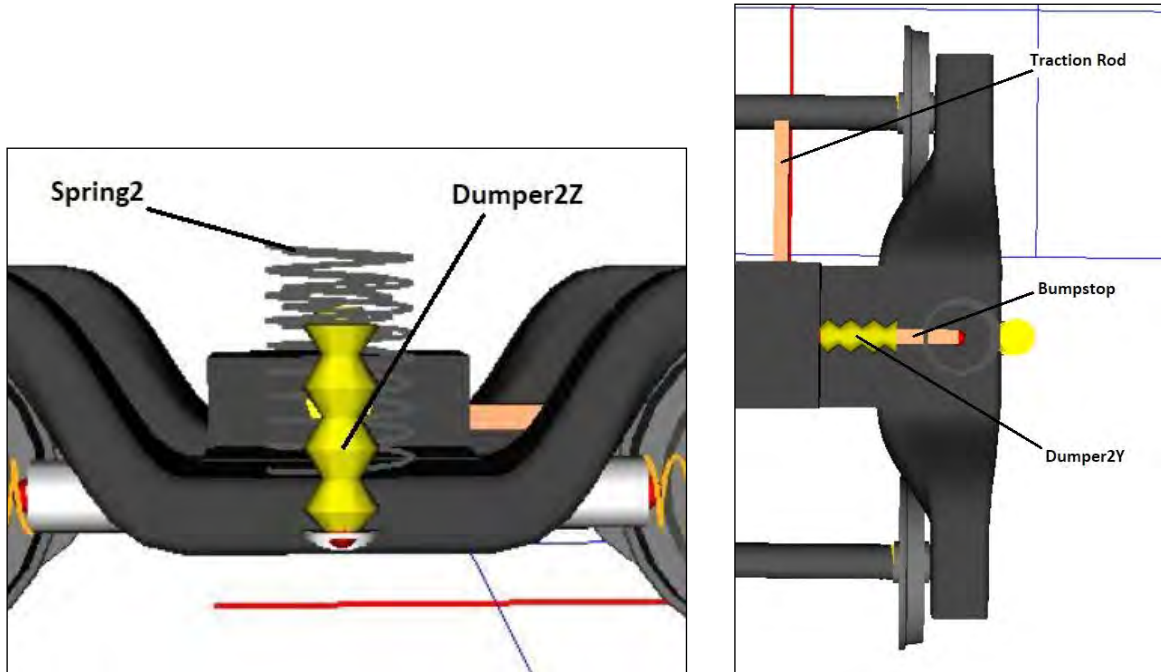


Figura 5.9: Componentes suspensión secundaria.

Añadir que la barra estabilizadora (Roll bar), no viene representada en el modelo, pero sí que está incluida en el sistema de suspensión y se ha tenido en cuenta para realizar los análisis. Este elemento, es el encargado de que ambas ruedas del mismo eje compartan el movimiento vertical generalmente en curvas.

Finalmente, para terminar con la descripción del modelo, se va a mostrar una tabla donde se indican las principales dimensiones del vehículo.

Dimensiones del vehículo ferroviario	
Magnitud	Valor (mm)
Mitad de la distancia entre bogies	9500
Mitad de la distancia longitudinal en el bogie	1280
Radio de las ruedas	460
Altura (sobre el nivel del rail) del c.d.g. del bogie	600
Altura (sobre el nivel del rail) del c.d.g. del vagón	1800
Desviación longitudinal y lateral del c.d.g. del vagón con respecto a su centro	0

Tabla 5.7: Dimensiones principales del modelo. [40]

5.3 PARÁMETROS SELECCIONADOS Y PROCESO DE ANÁLISIS

Una vez presentados los componentes del sistema de suspensión del modelo de vehículo ferroviario con el que vamos a trabajar, se han elegido unos parámetros en los que se va a centrar nuestra investigación para analizar el comportamiento dinámico de éste.

El elemento seleccionado para analizar, es el amortiguador “*Damper2Z*”, y más concretamente, la variación de su longitud a su paso por curva. Se trata de un amortiguador de tipo viscoelástico perteneciente al sistema de la suspensión secundaria, que se encarga de la amortiguación vertical del vehículo. La elección de este componente se debe a que para el trazado con el que vamos a trabajar, trazado curvo, el comportamiento de este componente se muestra de forma clara, lo que nos facilita la interpretación de los resultados y no permite obtener una idea de cómo se comporta en vehículo en su paso por curva.

Como hemos comentado anteriormente, se trata de un amortiguador viscoelástico, compuesto por un resorte y un amortiguador en serie, es decir, modelo de tipo ‘Maxwell’ (*Figura 2.29: Modelo de trabajo (Maxwell) de UM.*). La información relacionada con la viscoelasticidad y los amortiguadores, se recoge en el apartado 3 del segundo capítulo, “2.3. Viscoelasticidad”.

Éste componente, conecta el bastidor del bogie con la caja del coche, por tanto, es un elemento de la suspensión secundaria. En nuestro modelo de vehículo ferroviario, encontramos cuatro de estos amortiguadores, ubicados uno a cada lado de un bogie.

El parámetro en el que nos vamos a centrar, es la variación de la longitud de este amortiguador a su paso por curva. En el proceso de análisis de este parámetro, se van a seguir los siguientes pasos:

1. Por medio del programa de simulación, se hará pasar el vehículo por un tramo recto lo suficientemente largo hasta que la suspensión se haya estabilizado y no haya vibraciones. A continuación, tomará una curva de 90° con un radio determinado.
2. Una vez terminada la simulación, se obtendrá una gráfica (Longitud vs Distancia) que nos proporcionará el valor de la longitud, en milímetros, de cada uno de los cuatro amortiguadores a lo largo del recorrido, en metros. A continuación, se muestra una gráfica de ejemplo:

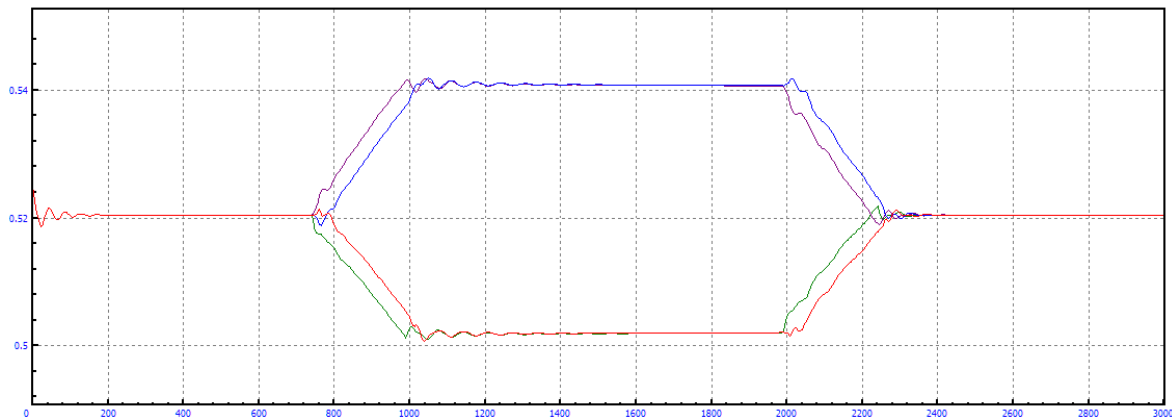


Figura 5.10: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=45\text{m/s}$.

- Una vez obtenida la gráfica, se procede a extraer los datos de interés de ella. En un principio, se distinguen cuatro líneas de diferente color que representan cada uno de los amortiguadores. A continuación, se muestra una tabla o leyenda para aclarar qué amortiguador representa cada línea.

Leyenda de las gráficas		
Color	Nombre del componente	
Verde	Damper2Z_1L	Amortiguador delantero izquierdo
Rojo	Damper2Z_2L	Amortiguador trasero izquierdo
Azul	Damper2Z_2R	Amortiguador trasero derecho
Morado	Damper2Z_1R	Amortiguador delantero derecho

Tabla 5.8: Leyenda de las gráficas.

Por otro lado, encontramos diferentes zonas en las que el valor de la longitud de los amortiguadores cambia. Dentro de la gráfica, distinguimos las siguientes zonas:

- Estabilización en el arranque:** se trata de la zona inicial. En ella, el vehículo arranca y comienza a acelerar hasta alcanzar la velocidad establecida. Durante el arranque, la masa suspendida, experimenta una fuerza en sentido opuesto al de la marcha, lo que provoca vibraciones en los amortiguadores. Estas vibraciones se experimentan hasta que el vehículo alcanza la velocidad deseada, luego, se estabiliza.
- Tramo recto antes de la curva:** el vehículo circula por un tramo recto una vez que se ha estabilizado antes de tomar la curva. Es en este intervalo de estabilidad donde vamos a tomar el **valor de la longitud inicial de referencia** de cada amortiguador, con el fin de compararlo con el valor de la longitud durante la curva.

- **Entrada a la curva:** este tramo es en el que el tren recorre la longitud de la curva de acuerdo, “P11”. Durante este tramo, el vehículo comienza a tomar la curva, y al variar la dirección del módulo del vector velocidad, aparece una aceleración normal y una fuerza centrífuga que alterará la estabilidad del vehículo. Además, debemos tener en cuenta que el peralte comienza durante este tramo. Esto implica que el carril exterior se eleva con respecto al carril interior y esto también genera vibraciones en el vehículo.
- **Estabilidad en curva:** en esta zona, el vehículo circula de forma estable por la curva, ya que la suspensión ha filtrado las vibraciones que se habían producido al entrar en la curva. En este tramo de estabilidad, **tomaremos de nuevo valores de la longitud de cada amortiguador** para compararlos con el valor de referencia y obtener una diferencia de longitud que nos indicará si el amortiguador se ha comprimido o se ha estirado.
- **Salida de la curva:** durante este tramo, al igual que el tramo de entrada en la curva, se corresponde con la curva de acuerdo “P12”. El peralte desaparece a lo largo de esta zona y esto genera vibraciones.
- **Tramo recto después de la curva:** una vez que se ha tomado la curva, el vehículo circula por un tramo recto para volver a un estado de estabilidad y filtrar las vibraciones que se habían producido al salir de la curva. Los amortiguadores vuelven al valor de longitud de referencia.

A continuación, se muestra una gráfica en la que se indican las partes que se han descrito anteriormente, con el fin de aclarar donde se localiza cada una de ellas.

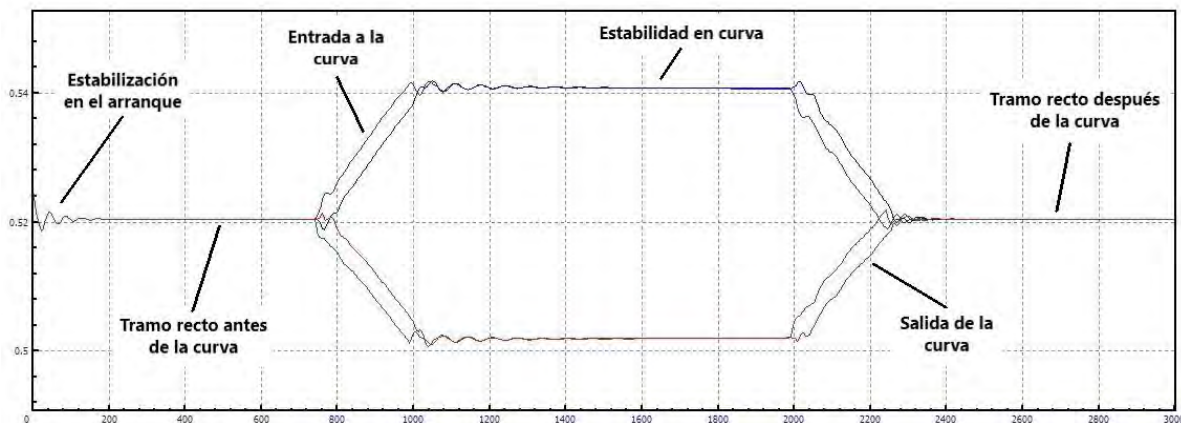


Figura 5.11: Partes de la gráfica.

4. Por último, de los valores extraídos en el apartado interior, se generan un archivo de Excel y se crean las tablas de cada experimento. En ellas, se calcula la diferencia de los dos valores de la longitud de cada amortiguador obtenidos, y se crean los gráficos que nos van a mostrar la evolución de la diferencia de longitud de los amortiguadores a su paso por diferentes curvas. Estos gráficos y tablas, nos ayudarán a extraer una conclusión de cada experimento y a entender el comportamiento del vehículo cuando circula por una curva.

Finalmente, comentar que se barajó la opción de analizar la fuerza que transmite el amortiguador al bogie, pero al analizar las gráficas que se obtienen del software, se decidió no analizar la fuerza, ya que la información de las gráficas no era tan clara como las que obtenemos analizando la variación de longitud y, por tanto, hubiéramos tenido muchas dificultades para completar el proyecto.



Figura 5.12: Fuerza que ejerce el amortiguador sobre el bogie (gráfica de muestra).

5.4 EXPERIMENTO 1

En este primer experimento se va a estudiar la variación de la longitud del amortiguador que hemos seleccionado, *Damper2Z*, a su paso por tres curvas de diferentes radios, concretamente de 1, 2 y 5 km. El análisis se llevará a cabo para un intervalo de velocidades que van desde 5 m/s hasta la velocidad de descarrilamiento del vehículo en cada curva. Los incrementos en la velocidad son de 5 m/s.

A continuación, se muestra una tabla con los valores de los parámetros de la geometría de cada una de las curvas.

Parámetro	Curva 1km	Curva 2km	Curva 5km
L1	750	750	750
P11	250	500	1250
S1	1000	2000	5000
R1	1000	2000	5000
H1	0.09	0.09	0.09
P12	250	500	1250
L2	750	750	750
Recorrido total	3000	4500	9000

Tabla 5.9: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del experimento 1.

Como podemos observar en la tabla, hemos decidido incluir una longitud de tramo recto inicial y final de 750 metros, con el fin de que al vehículo tenga tiempo suficiente de estabilizarse al arranque y a la salida de la curva. Los demás parámetros, se han calculado de acuerdo a lo explicado en el apartado de “Geometría de la vía”.

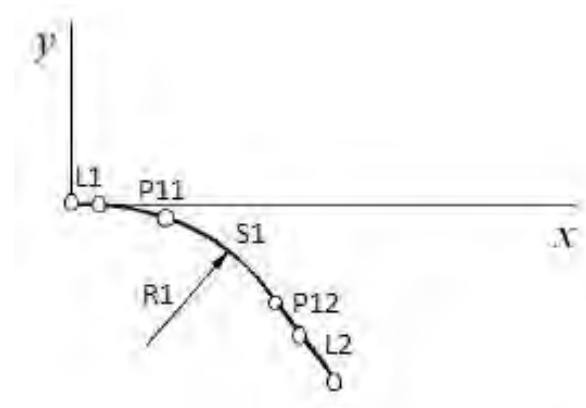


Figura 5.13: Geometría de la curva.

Para llevar a cabo este experimento, hemos considerado el valor por defecto del programa para algunos parámetros. Por un lado, el centro de masas, que se encuentra situado en el punto (0,0,0.538), en metros, lo que significa que se encuentra en la intersección de los planos YZ e XZ, y a una altura de 0.538 metros en el eje Z. Por otro lado, se ha considerado el valor por defecto de las constantes de rigidez y de amortiguación de todo el sistema de suspensión del vehículo, tanto la suspensión primaria como la suspensión secundaria.

5.4.1 CURVA 1KM

Para empezar, se va a mostrar la tabla generada a partir de los resultados de realizar la simulación del vehículo a su paso por la primera curva, de 1 kilómetro de radio. Para ello, se han extraído los datos siguiendo el proceso indicado en el apartado de *“Parámetros seleccionados y proceso de análisis”*. Las gráficas de las que hemos extraído los valores de todos los experimentos, están incluidas en el apartado de *“Anexos”*.

En la siguiente gráfica que se muestra a continuación, se van a indicar los puntos de dónde se han extraído los datos de la longitud de los amortiguadores, con el fin de mostrar de forma más clara cómo se han llevado a cabo todos los experimentos.

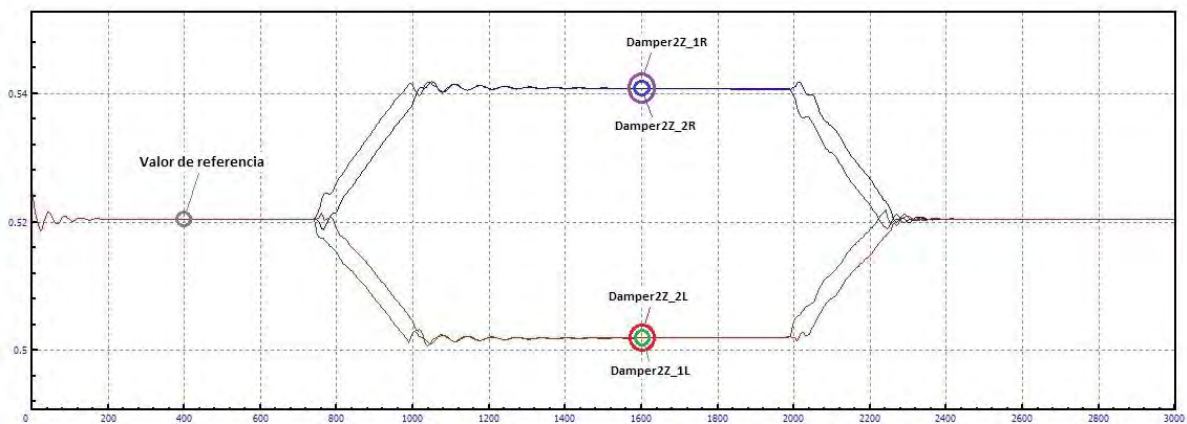


Figura 5.14: Puntos de extracción de los datos para experimento 1.

Velocidad (m/s)	Valor de referencia (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
5	52.044	52.92	51.43	51.45	52.94
10	52.044	52.8	51.51	51.52	52.81
15	52.044	52.59	51.62	51.64	52.6
20	52.044	52.31	51.8	51.81	52.32
25	52.044	51.98	52.05	52.06	51.99
30	52.044	51.63	52.4	52.41	51.64
35	52.044	51.24	52.87	52.88	51.25
40	52.044	50.76	53.44	53.44	50.77
45	52.044	50.19	54.08	54.08	50.2
50	52.044	49.55	54.8	54.8	49.56
55	52.044	48.82	55.59	55.6	48.83
60	52.044	48.01	56.45	56.46	48.02
65	52.044	47.11	57.36	57.38	47.12

Tabla 5.10: Resultados curva R=1km (Experimento 1).

Como podemos observar en la tabla, solo ha sido necesario obtener un valor de referencia para la longitud de los amortiguadores. Esto se debe a que el centro de masas está situado en el eje Z, y, por tanto, existe simetría con respecto al eje X e Y, por lo que la carga se encuentra repartida por igual entre los cuatro amortiguadores. Esto significa, que cuando el vehículo se encuentre en estático o estable, los cuatro amortiguadores van a sufrir la misma variación de longitud.

Además, el valor de referencia es el mismo para todas las velocidades ya que, aparte de existir simetría, el valor de las constantes de rigidez y amortiguación no varía, lo que implica que la compresión para los cuatro amortiguadores es la misma.

Por otro lado, como se ha podido comprobar, la velocidad máxima del vehículo para circular por la curva de 1km es de 65 m/s, lo que equivale a 234 km/h.

A continuación, se muestran los valores de la variación de longitud, que han sido calculados restando el valor de la longitud durante la curva, al valor de referencia.

***NOTA: Para la siguiente tabla y para las de los demás experimentos que son similares a ésta, los valores positivos significan que el amortiguador experimenta un alargamiento en su longitud y los valores negativos representan un encogimiento o compresión.**

Velocidad (m/s)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
5	0.876	-0.614	-0.594	0.896
10	0.756	-0.534	-0.524	0.766
15	0.546	-0.424	-0.404	0.556
20	0.266	-0.244	-0.234	0.276
25	-0.064	0.006	0.016	-0.054
30	-0.414	0.356	0.366	-0.404
35	-0.804	0.826	0.836	-0.794
40	-1.284	1.396	1.396	-1.274
45	-1.854	2.036	2.036	-1.844
50	-2.494	2.756	2.756	-2.484
55	-3.224	3.546	3.556	-3.214
60	-4.034	4.406	4.416	-4.024
65	-4.934	5.316	5.336	-4.924

Tabla 5.11: Variación de longitud en curva de $R=1\text{km}$ (Experimento 1).

La gráfica que se muestra a continuación nos enseña la evolución de la variación de la longitud de los amortiguadores con respecto a la velocidad con la que el vehículo toma la curva.

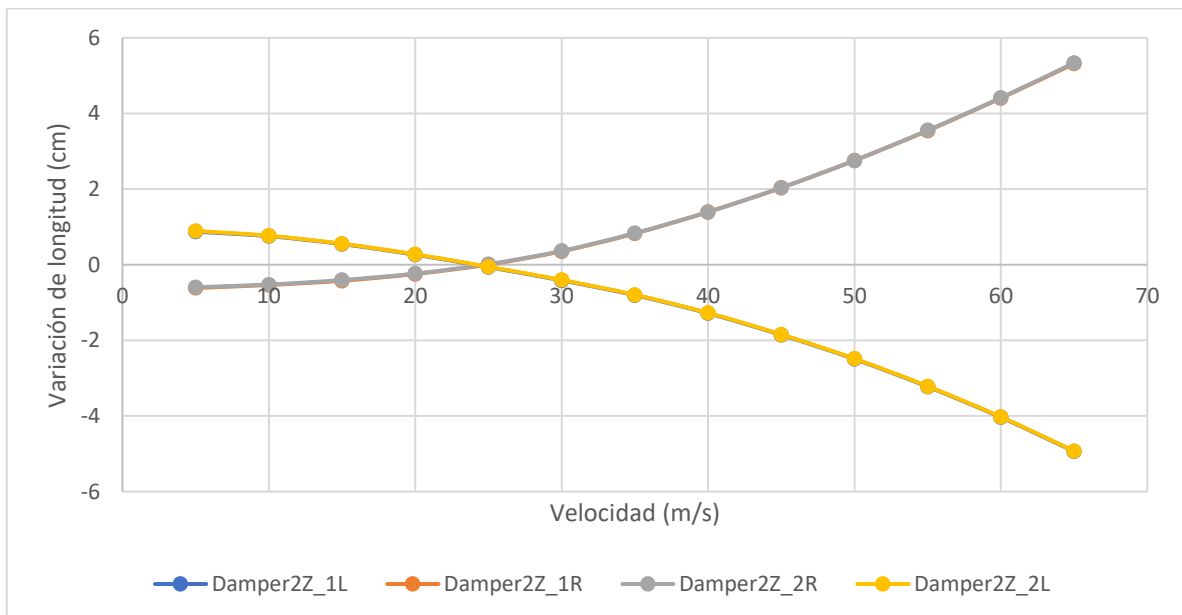


Figura 5.15: Variación de longitud VS Velocidad en curva $R=1\text{km}$ (Experimento 1).

Si se analiza el gráfico, nos damos cuenta de que las líneas de tendencia de los amortiguadores delantero derecho y trasero derecho están solapadas, al igual que los amortiguadores izquierdos. Esto significa que los dos amortiguadores derechos tienen un comportamiento muy similar, y lo mismo ocurre con los traseros. Por tanto, distinguimos la línea de tendencia gris, que muestra el comportamiento de los amortiguadores de la parte derecha, y la línea de tendencia amarilla, que representa el de los izquierdos.

Además, hay un momento en el que los cuatro amortiguadores experimentan una variación de la longitud casi nula, es decir, ni se están estirando ni comprimiendo. Es en este punto en el que los amortiguadores derechos que a bajas velocidades se encontraban a compresión pasan a estirarse, y lo opuesto ocurre con los amortiguadores izquierdos, que empiezan estirados y según aumenta la velocidad se van comprimiendo. Este hecho ocurre cuando el vehículo circula a aproximadamente 25 m/s.

Cuando el vehículo circula a la velocidad máxima, 65 m/s, los amortiguadores alcanzan los valores máximos de compresión y alargamiento, que son 4.934 cm y 5.336 cm respectivamente.

5.4.2 CURVA 2KM

Los resultados obtenidos para esta curva son los siguientes.

Velocidad (m/s)	Valor de referencia (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
5	52.044	52.93	51.42	51.43	52.93
10	52.044	52.86	51.46	51.46	52.87
15	52.044	52.76	51.52	51.52	52.76
20	52.044	52.61	51.6	51.6	52.62
25	52.044	52.43	51.71	51.71	52.43
30	52.044	52.22	51.85	51.86	52.22
35	52.044	51.98	52.04	52.04	51.99
40	52.044	51.74	52.27	52.27	51.74
45	52.044	51.48	52.56	52.56	51.48
50	52.044	51.19	52.91	52.91	51.19
55	52.044	50.86	53.31	53.31	50.86
60	52.044	50.48	53.74	53.74	50.48
65	52.044	50.06	54.21	54.21	50.06
70	52.044	49.6	54.72	54.72	49.61
75	52.044	49.11	55.27	55.27	49.11
80	52.044	48.57	55.85	55.85	48.57
85	52.044	47.98	56.46	56.47	47.99
90	52.044	47.34	57.11	57.12	47.35
95	52.044	46.67	57.79	57.8	46.68

Tabla 5.12: Resultados curva R=2km (Experimento 1).

Al igual que ocurre con los resultados de la primera curva, solo ha sido necesario obtener un valor de referencia, ya que el centro de gravedad se encuentra en los ejes X e Y de simetría y, por tanto, la carga que soporta cada amortiguador es la misma.

Además, en este caso, la velocidad máxima a la que puede circular el vehículo por la curva sin descarrilar es de 95 m/s, equivalente a 342 km/h.

En la siguiente tabla se muestra la variación de longitud de los amortiguadores al tomar esta curva a diferentes velocidades de circulación.

Velocidad (m/s)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
5	0.886	-0.624	-0.614	0.886
10	0.816	-0.584	-0.584	0.826
15	0.716	-0.524	-0.524	0.716
20	0.566	-0.444	-0.444	0.576
25	0.386	-0.334	-0.334	0.386
30	0.176	-0.194	-0.184	0.176
35	-0.064	-0.004	-0.004	-0.054
40	-0.304	0.226	0.226	-0.304
45	-0.564	0.516	0.516	-0.564
50	-0.854	0.866	0.866	-0.854
55	-1.184	1.266	1.266	-1.184
60	-1.564	1.696	1.696	-1.564
65	-1.984	2.166	2.166	-1.984
70	-2.444	2.676	2.676	-2.434
75	-2.934	3.226	3.226	-2.934
80	-3.474	3.806	3.806	-3.474
85	-4.064	4.416	4.426	-4.054
90	-4.704	5.066	5.076	-4.694
95	-5.374	5.746	5.756	-5.364

Tabla 5.13: Variación de longitud en curva de R=2km (Experimento 1).

Y a continuación, se encuentra el gráfico elaborado a partir de los datos de la tabla anteriormente mostrada.

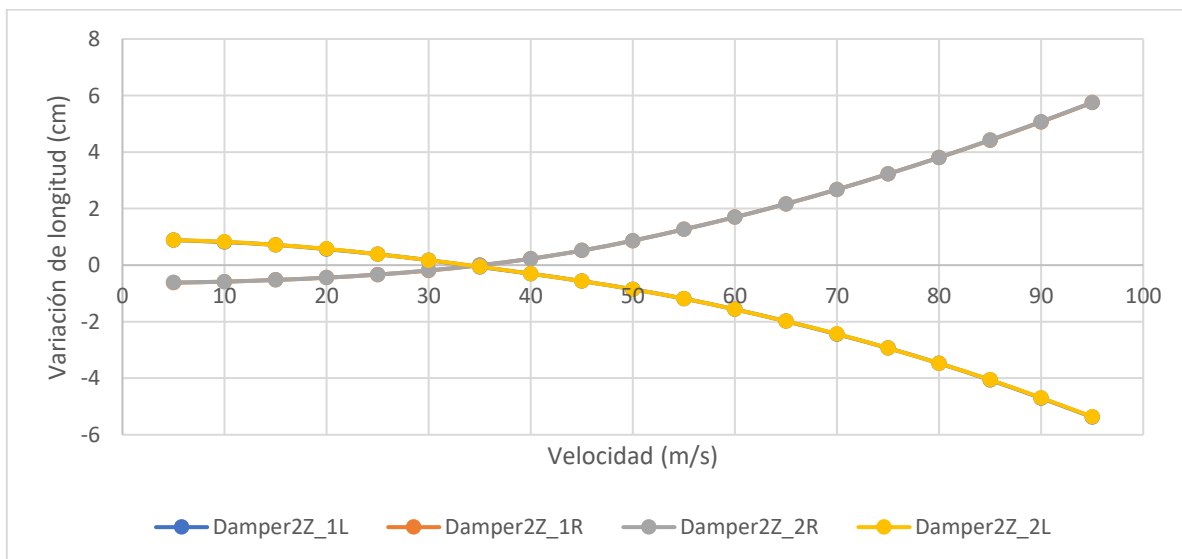


Figura 5.16: Variación de longitud VS Velocidad en curva R=2km (Experimento 1).

Observando la gráfica, nos damos cuenta de que los amortiguadores se comportan de forma similar que en la curva anterior. Los amortiguadores derechos se solapan y los izquierdos también, debido a su comportamiento idéntico.

En este caso, el punto en el que los amortiguadores derechos pasan de estar comprimidos a estirarse, y los amortiguadores izquierdos al revés, se encuentra cuando la velocidad del vehículo es de aproximadamente 35 m/s.

Por otro lado, la variación de longitud máxima que se observa en el gráfico se da, al igual que en la gráfica de la curva anterior, cuando la velocidad es máxima, en este caso a 95 m/s. El valor máximo de compresión y alargamiento es de 5.374 cm y 5.756 cm respectivamente.

5.4.3 CURVA 5KM

Los resultados correspondientes a esta curva se muestran a continuación.

Velocidad (m/s)	Valor de referencia (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
5	52.044	52.93	51.42	51.42	52.93
10	52.044	52.9	51.43	51.43	52.91
15	52.044	52.86	51.46	51.46	52.87
20	52.044	52.8	51.49	51.49	82.81
25	52.044	52.73	51.53	51.54	52.73
30	52.044	52.63	51.58	51.59	51.64
35	52.044	52.53	51.64	51.65	52.53
40	52.044	52.41	51.72	51.72	52.41
45	52.044	52.28	51.8	51.81	52.28
50	52.044	52.14	51.91	51.91	52.14
55*	52.044	51.99	52.03	52.03	51.99
60*	52.044	51.82	52.18	52.19	51.83
65*	52.044	51.65	52.35	52.36	51.66
70*	52.044	51.54	52.49	52.5	51.55
75*	52.044	51.3	52.77	52.77	51.3
80*	52.044	51.12	52.97	52.96	51.17
85*	52.044	50.94	53.21	53.21	50.92
90*	52.044	50.71	53.47	53.47	50.71
95*	52.044	50.47	53.75	53.75	50.47
100*	52.044	50.21	54.04	54.04	50.21
105*	52.044	49.93	54.35	54.35	49.93
110*	52.044	49.64	54.67	54.67	49.64
115*	52.044	49.34	55.01	55.02	49.34
120*	52.044	49.01	55.36	55.37	49.01
125*	52.044	48.67	55.73	55.74	48.67
130*	52.044	48.31	56.12	56.12	48.32
135*	52.044	47.93	56.51	56.52	47.94
140*	52.044	47.53	56.91	56.92	47.54
145*	52.044	47.11	57.33	57.34	47.12
150*	52.044	46.68	57.77	57.78	46.69
155*	52.044	46.24	58.22	52.24	46.25

Tabla 5.14: Resultados curva R=5km (Experimento 1).

Al igual que en las dos curvas anteriores, sólo hemos necesitado de un valor de referencia para los cuatro amortiguadores debido a que el centro de masas se encuentra en los ejes de simetría X e Y.

Como podemos observar en la tabla, las velocidades que van desde 55 a 155 m/s, están marcadas con un asterisco (*) debido a que en estas gráficas se han registrado irregularidades, que podrían ser vibraciones, en los cuatro amortiguadores al salir de la curva. Estas irregularidades, aparecen durante la curva en algunos casos, en otros sólo al entrar y salir de la curva y hay casos en los que aparece durante casi todo el recorrido. A continuación, se muestra una gráfica para mostrar claramente como son las irregularidades que hemos comentado.

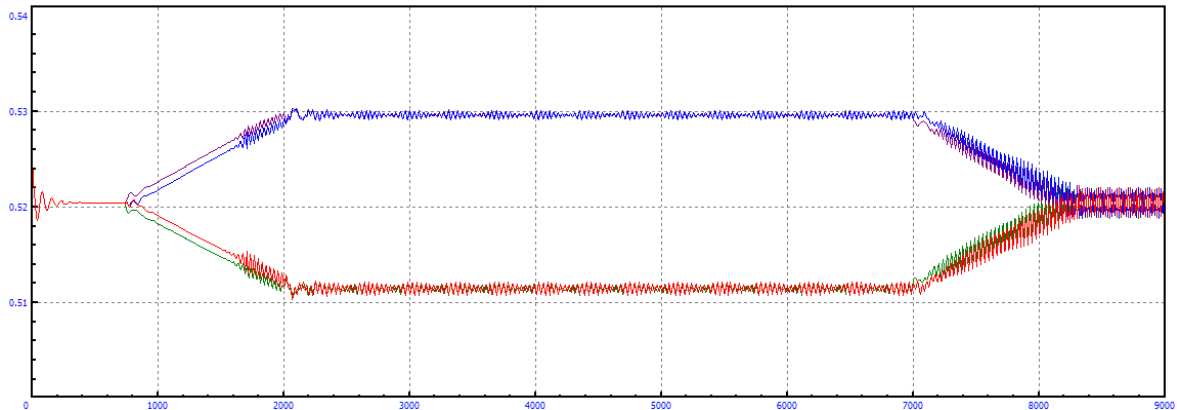


Figura 5.17: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=80\text{m/s}$.

Para este caso, se observa que la velocidad máxima a la que se ha podido completar la simulación sin que el vehículo descarrile es de 155 m/s, o lo que es lo mismo, 558 km/h.

A continuación, se muestra la tabla con las variaciones de longitud de los amortiguadores ya calculadas.

Velocidad (m/s)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
5	0.886	-0.624	-0.624	0.886
10	0.856	-0.614	-0.614	0.866
15	0.816	-0.584	-0.584	0.826
20	0.756	-0.554	-0.554	0.766
25	0.686	-0.514	-0.504	0.686
30	0.586	-0.464	-0.454	-0.404
35	0.486	-0.404	-0.394	0.486
40	0.366	-0.324	-0.324	0.366
45	0.236	-0.244	-0.234	0.236
50	0.096	-0.134	-0.134	0.096
55	-0.054	-0.014	-0.014	-0.054
60	-0.224	0.136	0.146	-0.214
65	-0.394	0.306	0.316	-0.384
70	-0.504	0.446	0.456	-0.494
75	-0.744	0.726	0.726	-0.744
80	-0.924	0.926	0.916	-0.874
85	-1.104	1.166	1.166	-1.124
90	-1.334	1.426	1.426	-1.334
95	-1.574	1.706	1.706	-1.574
100	-1.834	1.996	1.996	-1.834
105	-2.114	2.306	2.306	-2.114
110	-2.404	2.626	2.626	-2.404
115	-2.704	2.966	2.976	-2.704
120	-3.034	3.316	3.326	-3.034
125	-3.374	3.686	3.696	-3.374
130	-3.734	4.076	4.076	-3.724
135	-4.114	4.466	4.476	-4.104
140	-4.514	4.866	4.876	-4.504
145	-4.934	5.286	5.296	-4.924
150	-5.364	5.726	5.736	-5.354
155	-5.804	6.176	6.196	-5.794

Tabla 5.15: Variación de longitud en curva de R=5km (Experimento 1).

Seguidamente, se muestra el gráfico que nos relaciona la variación de longitud de los amortiguadores con la velocidad del vehículo.

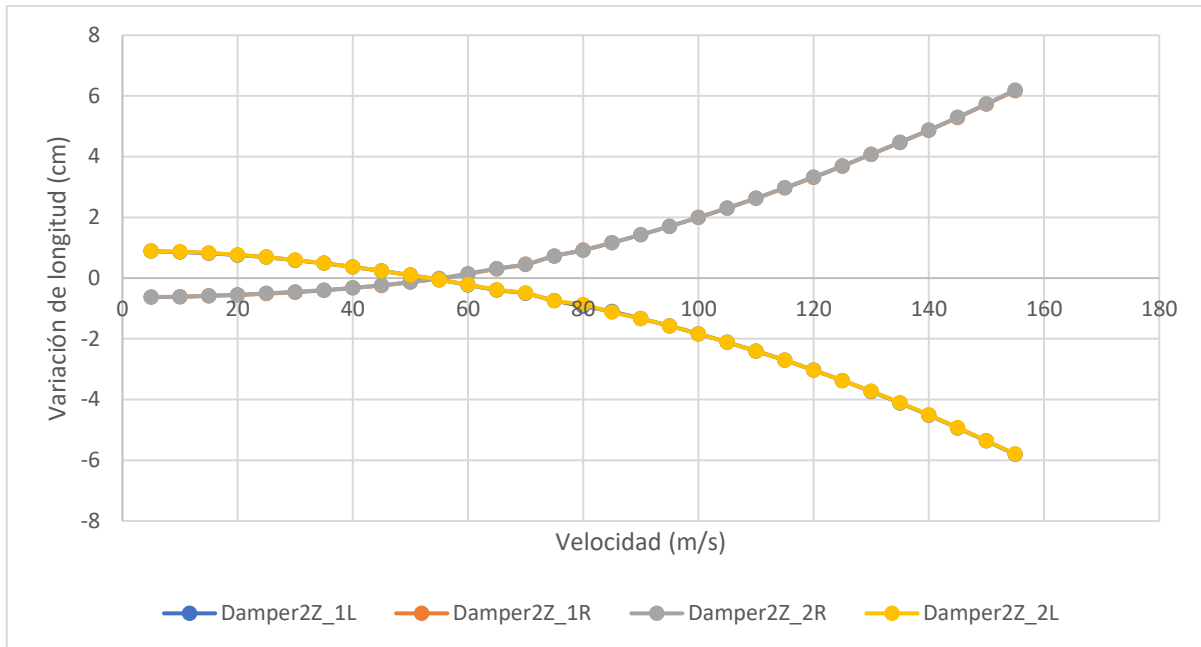


Figura 5.18: Variación de longitud VS Velocidad en curva $R=5\text{km}$ (Experimento 1).

Al igual que en los dos casos anteriores, los amortiguadores derechos e izquierdos tienen un comportamiento muy similar y se solapan.

Para esta gráfica en concreto, se observa que el punto en el que los amortiguadores derechos pasan de estar comprimidos a alargarse, y los amortiguadores izquierdos al revés, tiene lugar a una velocidad de circulación de aproximadamente 55 m/s.

Por otro lado, de nuevo similar a las dos gráficas anteriores, los valores de máxima compresión y alargamiento tienen lugar a velocidad máxima, 155 m/s, y tienen un valor de 5.804 cm y 6.196 cm respectivamente.

5.4.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 1

En este apartado se van a comentar y comparar los resultados obtenidos en las tres curvas en las que hemos realizado el primer experimento.

Como se puede observar en los gráficos, y hemos comentado anteriormente en la curva de radio 1km, las líneas de tendencia de los amortiguadores derechos están superpuestas, y lo mismo ocurre con los amortiguadores izquierdos. La razón de este hecho es que se trata de un modelo simétrico, por tanto, ambos amortiguadores tienen un comportamiento similar y, es por esto que se estiran y se comprimen casi lo mismo, con una diferencia de milésimas o incluso menos. Por tanto, la línea de tendencia gris representa la variación de longitud de los amortiguadores derechos o del interior y la línea de tendencia amarilla los izquierdos o del exterior.

Si se analizan los gráficos, nos damos cuenta de que la velocidad máxima de circulación es mayor según aumenta el radio de la curva. Por tanto, significa que el radio y la velocidad máxima son directamente proporcionales. Con el fin de confirmar nuestro razonamiento, se muestra a continuación la expresión de la velocidad máxima de circulación en curva (1). Como podemos observar, la velocidad máxima es proporcional a la raíz cuadrada del radio de curvatura, R , y a una constante, C , que depende del peralte. En nuestro caso, la velocidad máxima para las curvas de 1, 2 y 5 kilómetros ha sido 65, 95 y 155 m/s respectivamente. Por último, añadir que la velocidad máxima alcanzada en la curva de 5 kilómetros, es una velocidad teórica obtenida con un simulador y que no se corresponde con la realidad, ya que es casi inalcanzable.

$$V_{max} = C \cdot \sqrt{R} \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (1)$$

A continuación, vamos a representar en una gráfica los valores de las velocidades máximas obtenidas de forma experimental. De esta forma, podemos comprobar que los resultados obtenidos para este parámetro se acercan bastante a los que deberíamos obtener según la expresión anteriormente mostrada, ya que la función a la que se aproxima nuestra gráfica es muy similar.

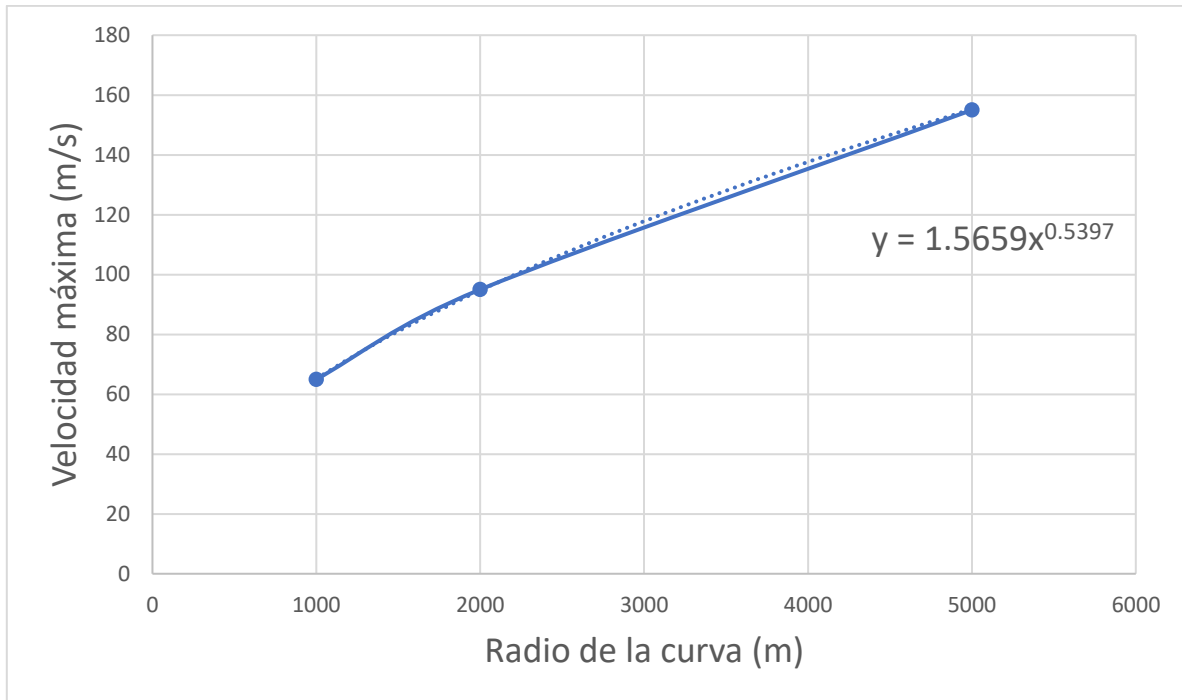


Figura 5.19: Relación entre velocidad máxima y radio de la curva del experimento 1.

Otro fenómeno de interés aparece cuando el vehículo circula a velocidades relativamente bajas. En esta situación, los amortiguadores derechos se encuentran comprimidos (negativo), mientras que los izquierdos están estirados (positivo). Esto significa que la caja del vehículo está inclinada hacia el interior de la curva, y se debe a que el momento generado por el peso del vehículo que tiende a inclinarlo hacia el interior (ayudado por el peralte), es mayor que el momento creado por la fuerza centrífuga que depende del módulo de la velocidad del vehículo y tiende a inclinarlo hacia el exterior de la curva (sentido opuesto).

Sin embargo, a medida que la velocidad va aumentando, existe un valor de la velocidad en el que este fenómeno anteriormente descrito se invierte, la fuerza centrífuga que empuja al vehículo hacia el exterior es mayor que la del peso del vehículo, y esto provoca que ahora los amortiguadores derechos se vayan estirando y los izquierdos comprimiendo hasta que el vehículo descarrila. En la figura que se muestra a continuación, podemos ver este fenómeno del que hablamos.

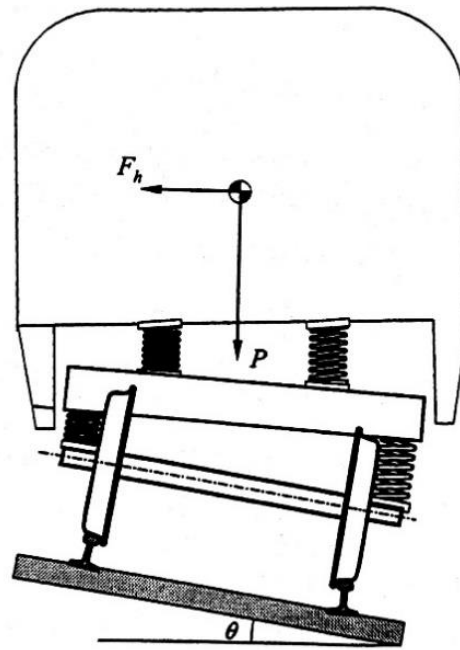


Figura 5.20: Vehículo circulando por curva peraltada, con suspensión en dos etapas. [3]

En lo que se refiere al valor de velocidad que hemos comentado en el párrafo anterior, en el que los amortiguadores pasan de estar comprimidos a estirarse y viceversa, se observa que éste aumenta cuanto mayor es el radio de la curva, es decir, cuanto más amplia es la curva. Pues bien, esto se debe a que la fuerza centrífuga, es inversamente proporcional al radio de la curva, como muestra su expresión (2), por tanto, cuanto mayor sea el radio de la curva, mayor será la velocidad necesaria para que el momento de la fuerza centrífuga iguale al momento creado por el peso. Y cuando esto ocurra, la caja del vehículo comenzará a inclinarse hacia el exterior de la curva.

$$F_{centrífuga} = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad [N] \quad (2)$$

Además, como se ha podido comprobar en la figura 5.22, la velocidad influye de forma directamente proporcional en el valor máximo de compresión y alargamiento, ya que, a mayor velocidad de circulación, mayor es el valor de la fuerza centrífuga que empuja al vehículo hacia el exterior de la curva, por tanto, mayor será el esfuerzo que la suspensión debe soportar, lo que implica una mayor variación de longitud los amortiguadores. Los valores más altos de variación de longitud alcanzados han sido en la curva de 5km de radio cuando el vehículo circulaba a velocidad máxima (155 m/s), y se han registrado valores de hasta 6.196 centímetros.

Sin embargo, para un mismo valor de velocidad de circulación, se observa que en la curva de 1km de radio es donde se experimenta la mayor variación de longitud, ya que, al tratarse de la curva menos amplia, y, por tanto, la más cerrada, el valor de la fuerza centrífuga es menor, ya que ésta es inversamente proporcional al radio de la curva, lo que provoca que el vehículo se incline hacia el interior de la curva, y los amortiguadores experimentan valores más altos de variación de longitud.

Por otro lado, se aprecia que las tres gráficas muestran un comportamiento bastante similar de los amortiguadores. En los tres casos, la evolución de la variación de la longitud de los amortiguadores podría aproximarse a una función cuadrática o parabólica. A continuación, se muestra una gráfica para ver con claridad la gran similitud de estas tres gráficas.

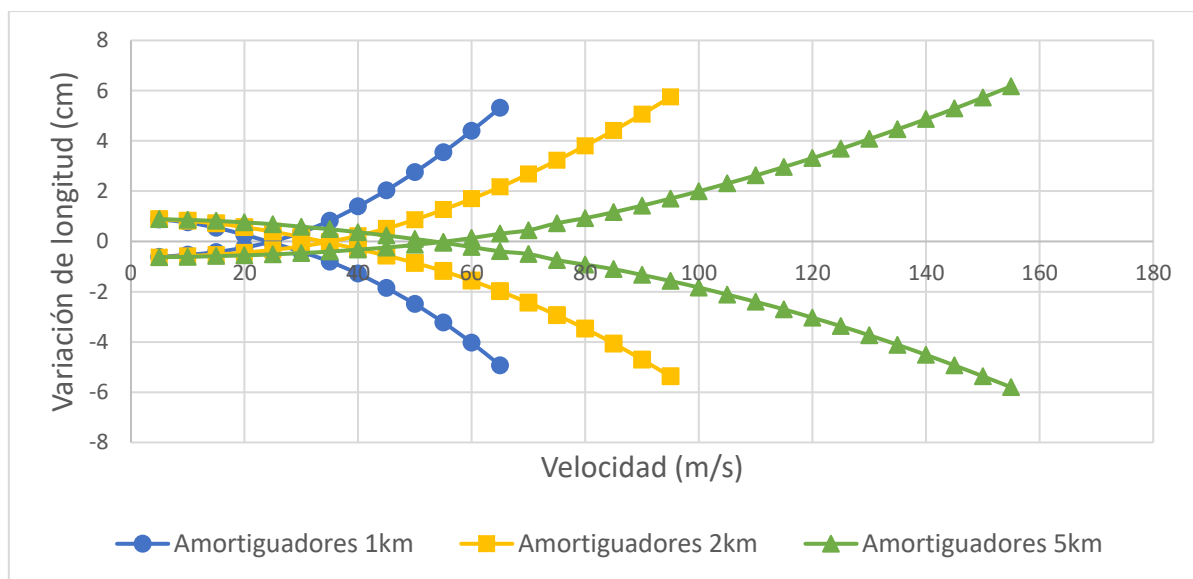


Figura 5.21: Comparación de la variación de longitud en experimento 1.

Debemos analizar también las irregularidades obtenidas durante la simulación de la curva de 5 km. Estas vibraciones aparecen a partir de los 50 m/s hasta la velocidad máxima de circulación, 155 m/s. En principio, para velocidades relativamente bajas comparadas con la velocidad máxima, como 60 m/s, no debería haber vibraciones a lo largo de la curva. Sin embargo, al tratarse de una simulación, es posible que algún factor o variable que desconocemos haya causado dichas vibraciones. De todos modos, para velocidades altas como 350 km/h, es comprensible que se creen vibraciones, ya que a esas velocidades es más difícil para la suspensión mantener el vehículo estable durante una curva.

A continuación, se muestra un ejemplo de gráfica con vibraciones y otro ejemplo de cómo debería de haberse comportado la suspensión al tomar la curva a la misma velocidad. Deberíamos haber observado un comportamiento estable durante todo el recorrido y sin la aparición de vibraciones.

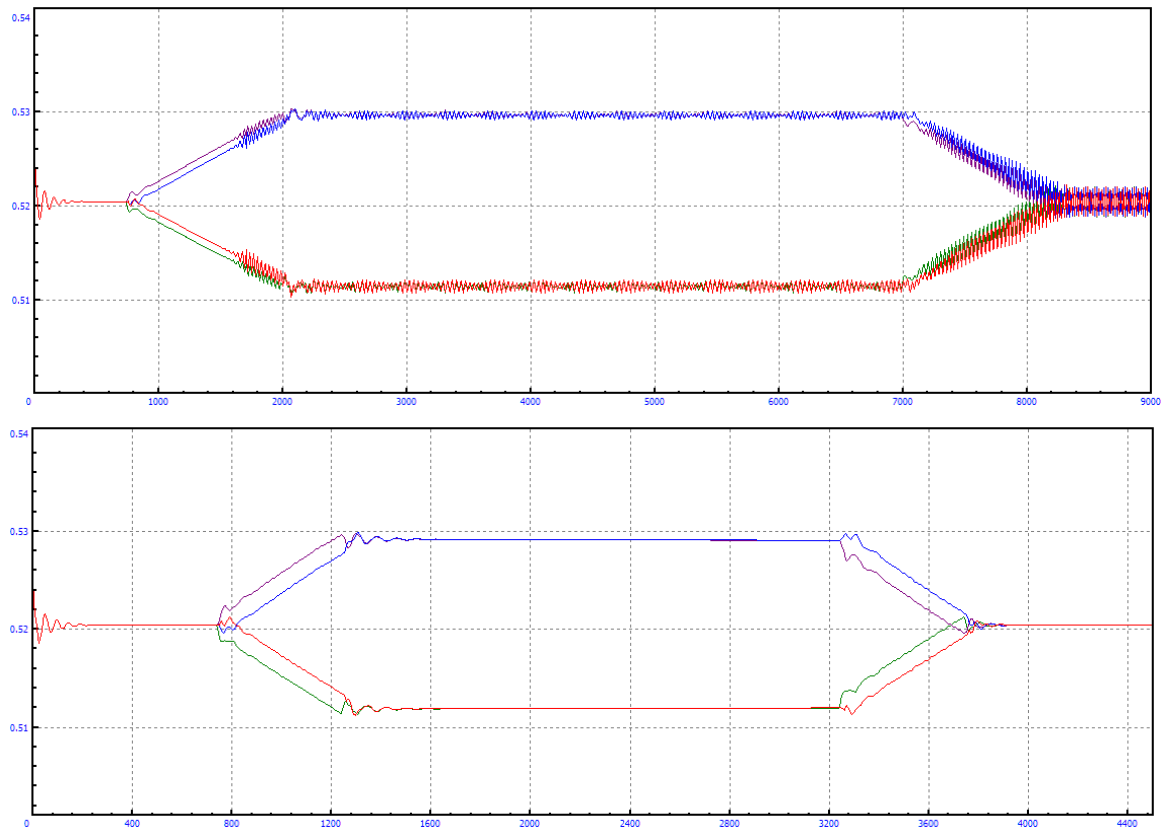


Figura 5.22: Comparación comportamiento estable (inferior) y con vibraciones (superior).

5.5 EXPERIMENTO 2

Para este experimento se va a analizar la variación de la longitud de los amortiguadores que hemos seleccionado, *Damper2Z*, a su paso por tres curvas de diferente amplitud, concretamente de 1, 2 y 5 km, y variando además los valores de las constantes de rigidez y amortiguación de la suspensión secundaria. El centro de masas no ha sido modificado y toma el valor predeterminado por el software. Se ubica en la posición (0,0,0.538), en metros.

Para esta variación de las constantes de rigidez y amortiguación, se ha modificado el valor predeterminado desde un -100% hasta un +100% con incrementos de 20%.

El estudio se llevará a cabo para un rango de velocidades que van desde 5 m/s hasta la velocidad de descarrilamiento del vehículo en cada curva. Los incrementos en la velocidad son de 5 m/s. Sin embargo, debido a la enorme cantidad de tiempo que requiere realizar este experimento para todo el intervalo de velocidades, sólo se han procesado los datos de lo que hemos denominado una **velocidad genérica**, que equivale a 40 m/s. De todos modos, se han realizado todas las simulaciones y se han obtenido todas las gráficas, que se encuentran adjuntas en el apartado de “*Anexos*”. Además, se ha calculado la velocidad máxima de circulación para las tres curvas y para cada una de las modificaciones realizadas.

Seguidamente, se muestra una tabla con los valores de los parámetros de la geometría de cada una de las curvas para este experimento.

Parámetro	Curva 1km	Curva 2km	Curva 5km
L1	1000	1500	1500
P11	250	500	1250
S1	1000	2000	5000
R1	1000	2000	5000
H1	0.09	0.09	0.09
P12	250	500	1250
L2	1500	1000	1000
Recorrido total	4000	5500	10000

Tabla 5.16: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del experimento 2.

Como se observa en la tabla, hemos modificado las longitudes de tramo recto de antes y después de la curva, L1 y L2 respectivamente. El objetivo de esta modificación es que el vehículo tenga tiempo suficiente de filtrar las vibraciones que se producen al arranque y a la salida de la curva y se estabilice, ya que, si cambiamos la dureza de la suspensión secundaria, el vehículo no tarda lo mismo en alcanzar la estabilidad.

Al igual que en el experimento 1, los demás valores de la geometría de la curva han sido calculados según las indicaciones del apartado “Geometría de la vía”. La geometría de estas curvas está representada en “Figura 5.13: Geometría de la curva.”, de igual manera que el anterior experimento.

En la tabla que se encuentra a continuación, se muestran los diferentes valores de las constantes de rigidez y amortiguación con los que vamos a trabajar en este experimento, la modificación que se ha realizado y al componente de la suspensión secundaria al que afectan.

Parámetro	Símbolo	Componente afectado	Valor predeterminado
Rigidez vertical	c2z	Spring2	430 kN/m
Rigidez longitudinal a cortante	c2x		160 kN/m
Rigidez a flexión	c2ax		10.5 kN·m/rad
Rigidez longitudinal a tracción	c_rod	Traction rod	5000 kN/m
Amortiguamiento longitudinal	d_rod		25 kN·s/m
Amortiguamiento lateral	d2y	Damper2Y	32 kN·s/m
Rigidez lateral	c2SeriesY		6000 kN/m
Amortiguamiento vertical	d2z	Damper2Z	20 kN·s/m
Rigidez vertical	c2SeriesZ		6000 kN/m
Rigidez a torsión	cRollBar	Roll bar	940 kN·m/rad

Tabla 5.17: Valores predeterminados de las constantes de rigidez y amortiguación.

Modificación	Parámetro					
	c2z (kN/m)	c2x (kN/m)	c2ax (kN·m/rad)	c_rod (kN/m)	d_rod (kN·s/m)	d2y (kN·s/m)
-100%	0	0	0	0	0	0
-80%	86	32	2.1	1000	5	6.4
-60%	172	64	4.2	2000	10	12.8
-40%	258	96	6.3	3000	15	19.2
-20%	344	128	8.4	4000	20	25.6
0%	430	160	10.5	5000	25	32
+20%	516	192	12.6	6000	30	38.4
+40%	602	224	14.7	7000	35	44.8
+60%	688	256	16.8	8000	40	51.2
+80%	774	288	18.9	9000	45	57.6
+100%	860	320	21	10000	50	64

Tabla 5.18: Modificación de los valores en experimento 2 (parte 1).

Modificación	Parámetro			
	c2SeriesY (kN/m)	d2z (kN·s/m)	c2SeriesZ (kN/m)	cRollBar (kN·m/rad)
-100%	0	0	0	0
-80%	1200	4	1200	188
-60%	2400	8	2400	376
-40%	3600	12	3600	564
-20%	4800	16	4800	752
0%	6000	20	6000	940
+20%	7200	24	7200	1128
+40%	8400	28	8400	1316
+60%	9600	32	9600	1504
+80%	10800	36	10800	1692
+100%	12000	40	12000	1880

Tabla 5.19: Modificación de los valores en experimento 2 (parte 2).

Por otro lado, se observa las modificaciones van desde -100% al 100% en intervalos de 20%. Además, apreciamos que la modificación de -100% significa que los valores son nulos. Sin embargo, hemos decidido realizar la simulación para ver los resultados que se obtendrían, aunque probablemente el software lo detecte como un error.

Una vez presentadas las tablas con las modificaciones que se van a realizar para cada valor de la constante de rigidez y amortiguación, vamos a pasar analizar los resultados obtenidos en las simulaciones de nuestro modelo en las tres curvas anteriormente descritas.

Al igual que se ha comentado en el experimento 1, las gráficas obtenidas como resultados de las simulaciones realizadas, se encuentran en el apartado de “Anexos” de este documento.

***NOTA ACLARATIVA:** Cuando se menciona “modificación” en las tablas se refiere al porcentaje que se ha modificado el valor de las constantes de rigidez y amortiguación de los componentes de la suspensión secundaria del vehículo con respecto a su valor por defecto (0%).

5.5.1 CURVA 1KM

A continuación, se muestran las tablas que contienen los resultados de las simulaciones para la curva de 1km de radio. Se debe tener en cuenta que todos los valores de las tablas que se muestran a continuación han sido extraídos de los gráficos de la misma forma que para el primer experimento, como se indica en “Figura 5.14: Puntos de extracción de los datos para experimento 1.”.

***NOTA: Todos los valores mostrados en las tablas han sido calculados para la velocidad genérica (40 m/s).**

Modificación	Valor de referencia (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-100%					
-80%	50.22	40.05	59.84	59.87	40.09
-60%	51.36	47.36	55.29	55.3	47.38
-40%	51.74	49.35	54.2	54.21	49.36
-20%	51.93	50.25	53.71	53.72	50.26
0%	52.04	50.76	53.43	53.44	50.77
+20%	52.12	51.08	53.25	53.26	51.09
+40%	52.17	51.3	53.13	53.13	51.31
+60%	52.22	51.46	53.03	53.04	51.46
+80%	52.25	51.58	52.96	52.97	51.58
+100%	52.27	51.67	52.91	52.91	51.67

Tabla 5.20: Resultados para la curva R=1km a una velocidad de 40 m/s (velocidad genérica).

Si se analiza la tabla, se observa que en la modificación de -100%, en la cual teníamos dudas de si iba a ser posible realizar la simulación, nos encontramos con que el software emite un aviso de que la simulación no se ha podido llevar a cabo. Por tanto, no ha sido posible realizar este experimento para unos valores de rigidez y amortiguación nulos de la suspensión secundaria.

Para este experimento, los valores de referencia han variado, ya que se ha modificado la dureza de la suspensión secundaria y esto afecta al comportamiento dinámico del vehículo. Por otro lado, al igual que en el experimento 1, sólo ha sido necesario obtener un valor de referencia, debido a que la condición de simetría del centro de masas se mantiene y el peso de la carga se reparte de forma equitativa entre los cuatro amortiguadores.

Seguidamente, se presenta la tabla, y el gráfico obtenido a partir de ésta, con la variación de longitud de los amortiguadores ya calculada. A modo de recordatorio, esta variación de longitud se obtiene restando el valor de la longitud obtenida cuando el vehículo está estable en curva al valor de la longitud de referencia.

Modificación	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-100%	0	0	0	0
-80%	-10.17	9.62	9.65	-10.13
-60%	-4	3.93	3.94	-3.98
-40%	-2.39	2.46	2.47	-2.38
-20%	-1.68	1.78	1.79	-1.67
0%	-1.28	1.39	1.4	-1.27
+20%	-1.04	1.13	1.14	-1.03
+40%	-0.87	0.96	0.96	-0.86
+60%	-0.76	0.81	0.82	-0.76
+80%	-0.67	0.71	0.72	-0.67
+100%	-0.6	0.64	0.64	-0.6

Tabla 5.21: Variación de longitud en curva de $R=1\text{km}$ (Experimento 2).

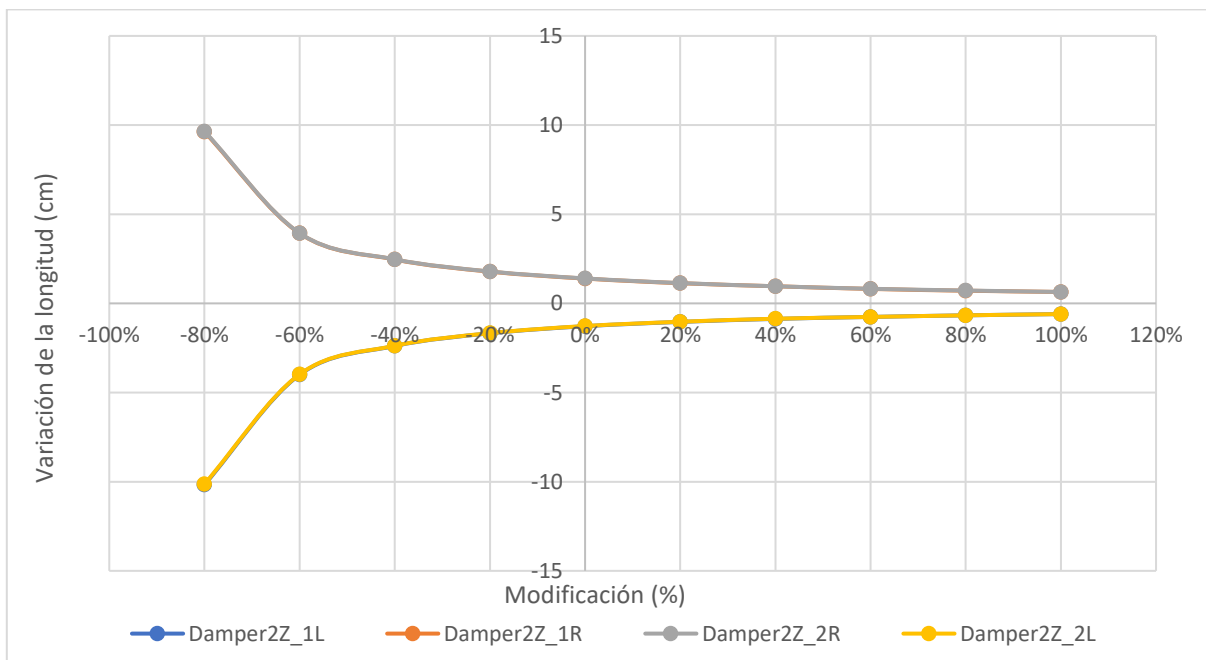


Figura 5.23: Variación de longitud VS Modificación a una velocidad de 40 m/s en una curva de $R=1\text{km}$ (Experimento 2).

Como se observa tanto en la gráfica como en la tabla, y al igual que ocurría en el primer experimento, los valores de la variación de longitud de los dos amortiguadores derechos son muy similares, lo mismo ocurre con los izquierdos. Esto provoca, el solapamiento de ambas líneas de tendencia, por lo que sólo apreciamos dos, una gris y una amarilla que representan a los amortiguadores derechos y a los amortiguadores izquierdos respectivamente.

Por otro lado, se observa cómo según vamos aumentando el valor de las constantes de rigidez y amortiguamiento, el valor de la variación de la longitud de los amortiguadores descende, tanto para los derechos que están estirados, como los izquierdos que se encuentran a compresión.

Por último, encontramos que los valores más elevados de la variación de longitud tienen lugar cuando el valor de las constantes es el más bajo, suspensión muy blanda (-80%), y alcanzan valores de 10.17 cm y 9.65 cm cuando los amortiguadores están a compresión y estirados respectivamente.

A continuación, se ha elaborado una tabla con las velocidades máximas de circulación por la curva de 1km de radio según la modificación realizada a las constantes de rigidez y amortiguación de la suspensión del vehículo.

Modificación	Velocidad máxima (m/s)
-80%	60
-60%	65
-40%	65
-20%	65
0%	65
+20%	70
+40%	70
+60%	70
+80%	70
+100%	70

Tabla 5.22: Velocidades críticas para curva R=1km (Experimento 2).

Analizando esta tabla, nos damos cuenta de que cuanto mayor sea el valor las constantes de rigidez y amortiguamiento, es decir, más dura sea la suspensión, mayor es la velocidad máxima de circulación por la curva.

5.5.2 CURVA 2KM

La tabla correspondiente a los resultados de la curva de radio 2 kilómetros se muestra a continuación. Recordar también, que los datos han sido calculados para la **velocidad genérica de valor 40 m/s**.

Modificación	Valor de referencia (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-100%					
-80%	50.22	48.06	52.07	52.08	48.07
-60%	51.36	50.54	52.06	52.07	50.54
-40%	51.74	51.22	52.15	52.16	51.22
-20%	51.93	51.54	52.22	52.22	51.55
0%	52.04	51.74	52.27	52.27	51.74
+20%	52.12	51.87	52.3	52.3	51.87
+40%	52.17	51.96	52.33	52.33	51.96
+60%	52.22	52.03	52.35	52.35	52.03
+80%	52.25	52.08	52.36	52.37	52.08
+100%	52.27	52.12	52.38	52.38	52.12

Tabla 5.23: Resultados para la curva R=2km a una velocidad de 40 m/s (velocidad genérica).

Si se analiza la tabla, se observa que al igual que en la curva de 1km, sólo ha sido necesario tomar un valor de referencia debido a la simetría del centro de masas. Además, nos encontramos con diferentes valores del valor de la longitud de referencia, al igual que en la primera curva, debido a la modificación en la dureza de la suspensión que hemos realizado en cada caso.

Por otro lado, la simulación con la modificación de -100% no se ha podido llevar a cabo por el programa, ya que no es posible simular si un elemento de la suspensión tiene todas sus constantes de rigidez y amortiguación nulas.

A continuación, se muestran la tabla y el gráfico que contienen los resultados obtenidos para la variación de la longitud de los amortiguadores en esta curva.

Modificación	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-100%	0	0	0	0
-80%	-2.16	1.85	1.86	-2.15
-60%	-0.82	0.7	0.71	-0.82
-40%	-0.52	0.41	0.42	-0.52
-20%	-0.39	0.29	0.29	-0.38
0%	-0.3	0.23	0.23	-0.3
+20%	-0.25	0.18	0.18	-0.25
+40%	-0.21	0.16	0.16	-0.21
+60%	-0.19	0.13	0.13	-0.19
+80%	-0.17	0.11	0.12	-0.17
+100%	-0.15	0.11	0.11	-0.15

Tabla 5.24: Variación de longitud en curva de R=2km (Experimento 2).

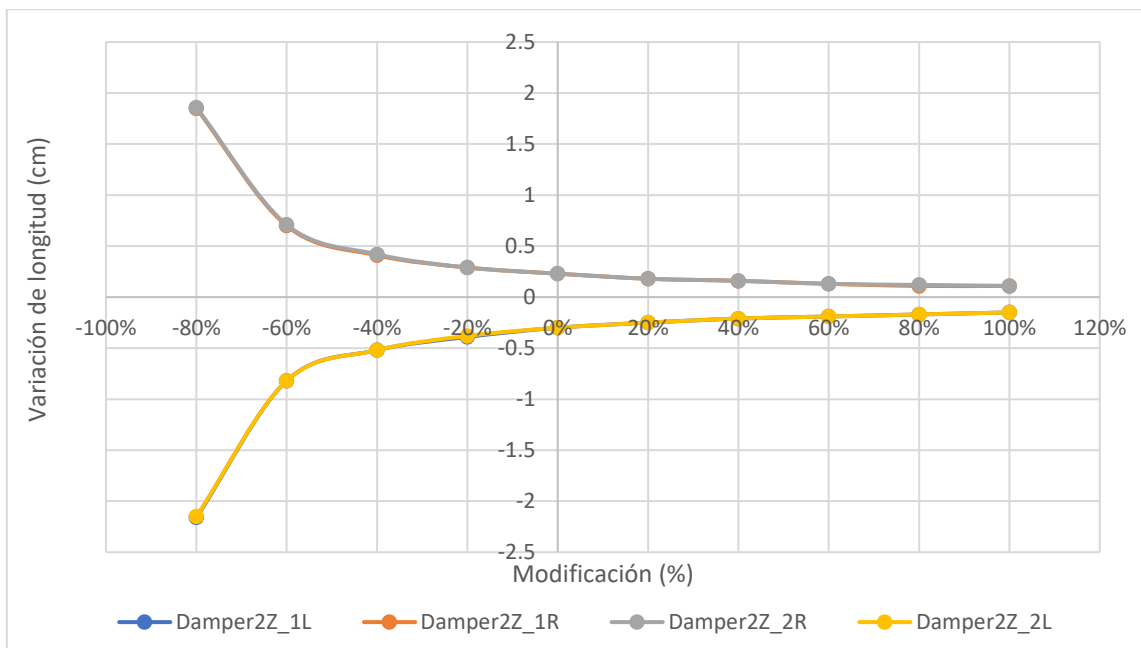


Figura 5.24: Variación de longitud VS Modificación a una velocidad de 40 m/s en una curva de R=2km (Experimento 2).

Como se observa en la gráfica, ocurre el mismo fenómeno que antes, hay un solapamiento entre los dos amortiguadores derechos que se encuentran estirados, y entre los dos izquierdos que se encuentran comprimidos. Por otro lado, el valor de la variación de la longitud disminuye según aumenta la dureza de la suspensión secundaria.

Los valores más altos de la variación de longitud de los amortiguadores, se encuentran cuando la suspensión se han reducido los valores de las constantes de rigidez y amortiguación en un +80%, y alcanza valores de 2.16 cm y 1.86 cm cuando los amortiguadores están comprimidos y estirados respectivamente.

Las velocidades máximas que hemos obtenido para esta curva según la dureza de la suspensión, están representadas en la siguiente tabla.

Modificación	Velocidad máxima (m/s)
-80%	85
-60%	90
-40%	95
-20%	95
0%	95
+20%	95
+40%	100
+60%	100
+80%	100
+100%	100

Tabla 5.25: Velocidades críticas para curva R=2km (Experimento 2).

Como se observa en la tabla, y al igual que en la curva anterior, se observa que la velocidad máxima es mayor cuanto más dura es la suspensión.

5.5.3 CURVA 5KM

Estos son los resultados obtenidos para la curva de radio 5 kilómetros.

Modificación	Valor de referencia (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-100%					
-80%	50.22	53.06	47.79	47.79	53.06
-60%	51.36	52.47	50.46	50.46	52.47
-40%	51.74	52.41	51.19	51.19	52.41
-20%	51.93	52.4	51.52	51.52	52.41
0%	52.04	52.41	51.72	51.72	52.41
+20%	52.12	52.42	51.85	51.85	52.42
+40%	52.17	52.42	51.94	51.94	52.43
+60%	52.22	52.43	52.02	52.01	52.43
+80%	52.25	52.44	52.07	52.07	52.44
+100%	52.27	52.44	52.11	52.11	52.45

Tabla 5.26: Resultados para la curva R=5km a una velocidad de 40 m/s (velocidad genérica).

Una vez más, nos encontramos con un único valor de longitud de referencia similar para los cuatro amortiguadores. Este valor es diferente en cada caso ya que varía el valor de las constantes de rigidez y amortiguación. Al igual que en los dos casos anteriores, no ha sido posible realizar la simulación para el caso de modificación -100%.

A continuación, se muestran la tabla con las variaciones de longitud calculadas y un gráfico en el que se han representado de forma gráfica.

Modificación	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-100%	0	0	0	0
-80%	2.84	-2.43	-2.43	2.84
-60%	1.11	-0.9	-0.9	1.11
-40%	0.67	-0.55	-0.55	0.67
-20%	0.47	-0.41	-0.41	0.48
0%	0.37	-0.32	-0.32	0.37
+20%	0.3	-0.27	-0.27	0.3
+40%	0.25	-0.23	-0.23	0.26
+60%	0.21	-0.2	-0.21	0.21
+80%	0.19	-0.18	-0.18	0.19
+100%	0.17	-0.16	-0.16	0.18

Tabla 5.27: Variación de longitud en curva de R=5km (Experimento 2).

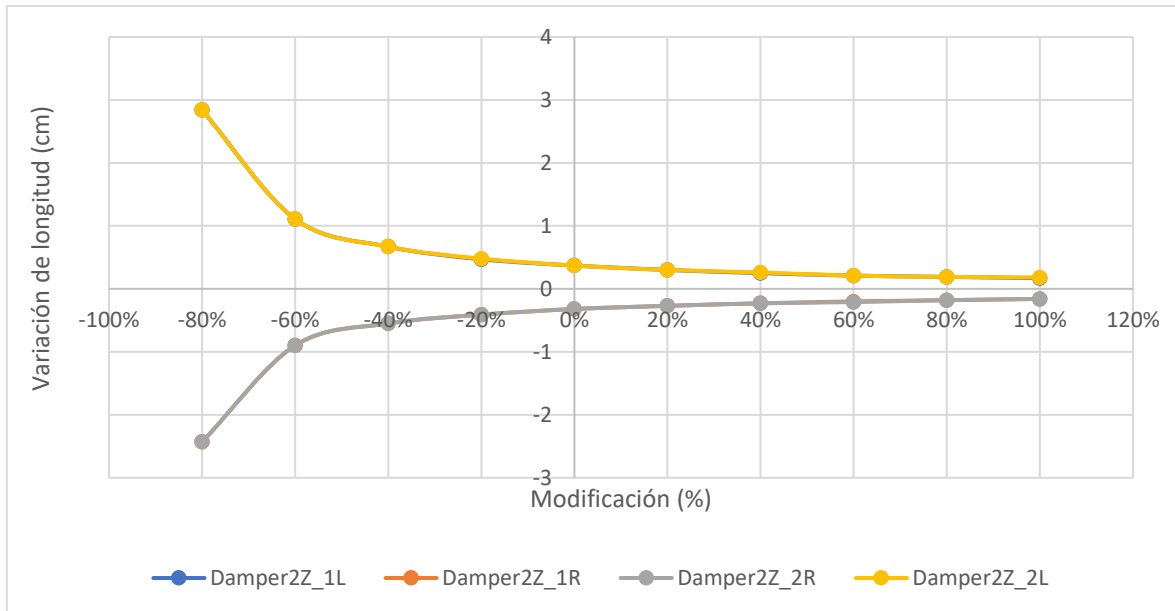


Figura 5.25: Variación de longitud VS Modificación a una velocidad de 40 m/s en una curva de $R=5\text{km}$ (Experimento 2).

Si se observa el gráfico, nos damos cuenta de que se repite el solapamiento entre los dos amortiguadores derechos, representados en gris, y los dos izquierdos, representados en amarillo, por tanto, solo distinguimos dos líneas de tendencia.

Sin embargo, en este caso los amortiguadores derechos se encuentran comprimidos, mientras que los izquierdos han sufrido un alargamiento.

Como podemos apreciar, los valores de la variación de longitud disminuyen según aumenta la dureza de la suspensión, como en los dos casos anteriores. Los valores más elevados de los amortiguadores a compresión y estirados son 2.43 cm y 2.84 cm respectivamente.

Finalmente, se muestra la tabla de las velocidades máxima en esta curva. No encontramos variación con respecto a las tablas de las curvas anteriores, cuanto más blanda es la suspensión, menor valor de velocidad máxima se obtiene.

Modificación	Velocidad máxima (m/s)
-80%	135
-60%	150
-40%	150
-20%	155
0%	155
+20%	155
+40%	155
+60%	155
+80%	155
+100%	155

Tabla 5.28: Velocidades críticas para curva $R=5\text{km}$ (Experimento 2).

5.5.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 2

A continuación, se va a proceder a discutir y comparar los resultados obtenidos en las tres curvas de este segundo experimento.

Antes de nada, comentar que en la modificación en la que los valores de las constantes de rigidez y de amortiguación eran cero, no ha sido posible obtener los resultados, ya que el software no nos permite realizar una simulación si alguno de los componentes de la suspensión tiene todos los valores de estas constantes nulos.

Primero, como hemos comentado después de cada gráfico, nos damos cuenta de que las líneas de tendencia están solapadas, es decir, el comportamiento de los amortiguadores derechos o interiores es tan similar que las líneas de tendencia de cada uno se superponen, lo mismo ocurre con los amortiguadores exteriores. Como se ha comentado en la discusión del experimento 1, esto se debe a la simetría del modelo que estamos estudiando.

Por un lado, se observa que los dos primeros gráficos son muy similares entre sí, los amortiguadores derechos se encuentran estirados mientras que los izquierdos están comprimidos. Sin embargo, cuando se analiza el gráfico de la última curva, nos damos cuenta de que ocurre lo contrario, los amortiguadores derechos funcionan ahora a compresión y los izquierdos se estiran. La razón a esto tiene que ver otra vez con el valor de la fuerza centrífuga que explicamos en el primer experimento.

Como ya sabemos, la fuerza centrífuga es una fuerza ficticia que empuja al vehículo hacia el exterior de una curva. Esta fuerza es inversamente proporcional al radio de la curva, y directamente proporcional a la masa del vehículo y a la velocidad lineal. Por tanto, como la velocidad lineal del vehículo y la masa de éste han sido constantes durante todo el experimento y hemos variado únicamente el radio de la curva, el momento generado por la fuerza centrífuga sobre el centro de masas en la curva de radio 5 kilómetros, no es lo suficientemente grande como para igualar o superar el momento creado por el peso, que es constante. De esta forma, el vehículo se encuentra inclinado hacia el interior de la curva haciendo que los amortiguadores derechos trabajen a compresión y los izquierdos se alarguen. Sin embargo, esto no ocurre para las curvas de 1 y 2 kilómetros de radio, ya que el valor del momento que crea la fuerza centrífuga a esa velocidad en estas dos curvas, supera al generado por el peso, y, por tanto, el vehículo queda inclinado hacia el exterior provocando que los amortiguadores exteriores de compriman y los interiores se estiren como se muestra en los gráficos.

En la realidad, es muy raro que esto ocurra en la curva de 5km de radio, ya que circulando a una velocidad relativamente alta (144 km/h), el vehículo no debería inclinarse hacia el interior de la curva, puesto que existe riesgo de vuelco. Por tanto, esto es un problema de exceso de altura del peralte, que hace que el momento que crea el peso sea demasiado grande y aumente el riesgo de vuelco del vehículo. La solución sería realizar un estudio de

la curva y recalcular el peralte, que tendrá un valor más pequeño que con el que estamos trabajando (9 centímetros).

Por otro lado, la forma de los tres gráficos es muy similar como se puede observar en la siguiente figura. Si se analiza la tendencia de los valores que aparecen en los gráficos, nos damos cuenta de que cuanto mayor es el valor de las constantes de amortiguación y de rigidez, menor es la variación de longitud que experimenta el amortiguador. Por tanto, la variación de longitud es inversamente proporcional a las constantes de rigidez y amortiguamiento del amortiguador. Además, si se observa la tendencia de ambas líneas, podríamos decir que la línea de tendencia superior (amortiguadores estirados) se aproximan a una función exponencial, mientras que la inferior (amortiguadores en compresión) se asemejan más a una función logarítmica.

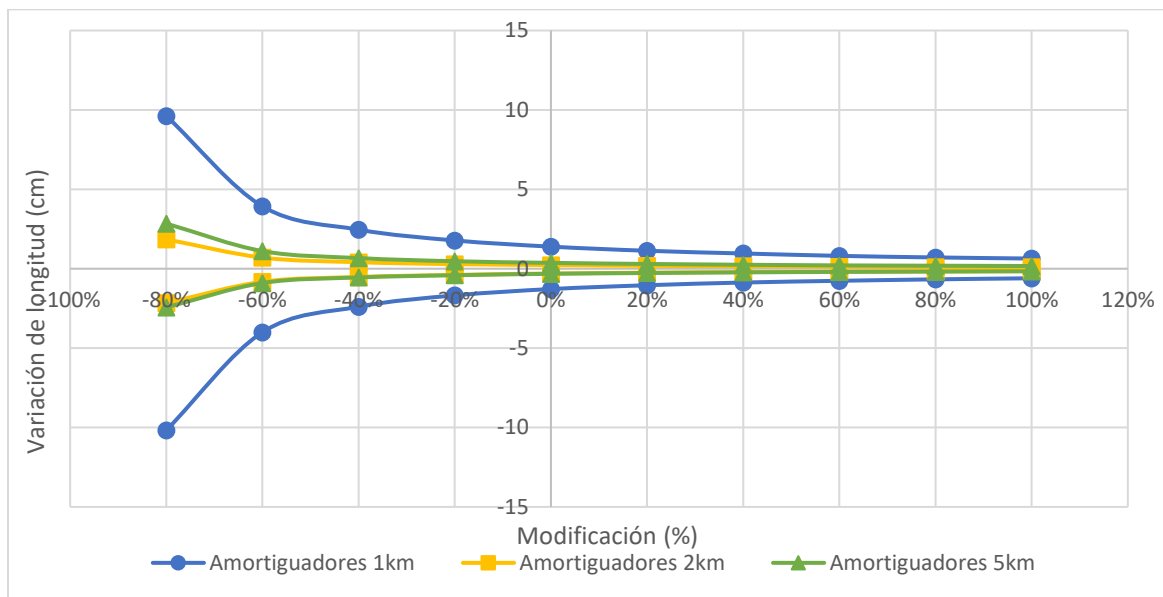


Figura 5.26: Comparación de la variación de longitud en experimento 2.

En lo que se refiere a los valores de la variación de longitud del amortiguador en el experimento, los obtenidos en la curva de radio 1km son los más elevados, llegando a registrarse una deformación de hasta 10.17 cm a compresión y 9.65 cm cuando el amortiguador está estirado. Este comportamiento se corresponde con la realidad, ya que, circulando a la misma velocidad, los amortiguadores experimentarán variaciones de longitud mayores en curvas de menor radio, es decir, más cerradas.

A continuación, vamos a proceder a analizar las velocidades máximas que hemos obtenido para cada modificación de los valores de las constantes de rigidez y amortiguación. Para ello, se muestra el siguiente gráfico que nos va a permitir comparar las velocidades máximas de cada una de las curvas.

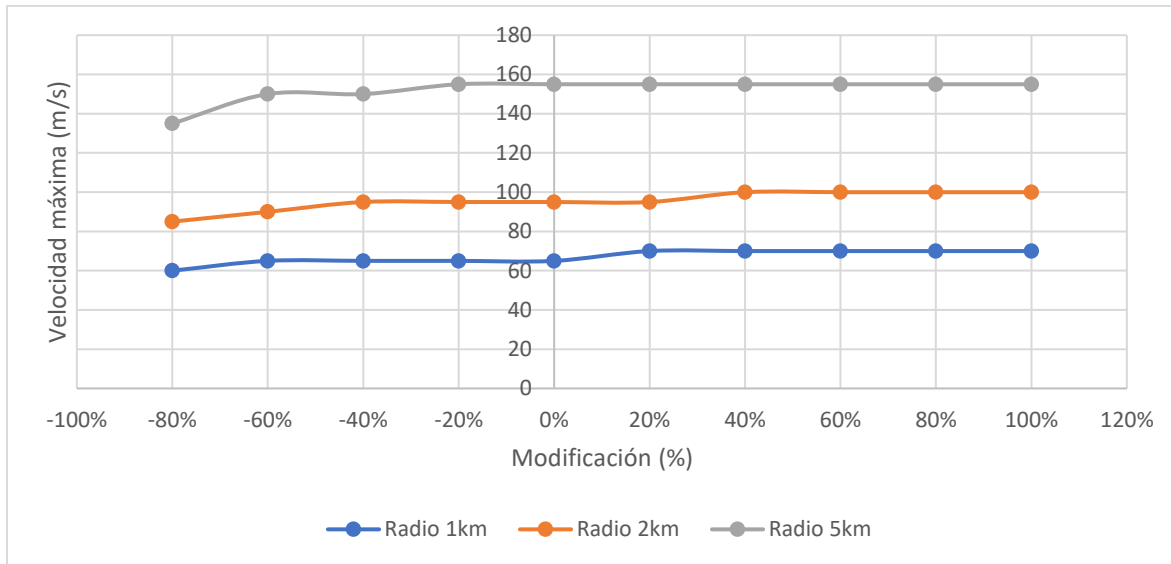


Figura 5.27: Comparación de la velocidad máxima en experimento 2.

Por lo que se observa en la gráfica, se aprecia que claramente la velocidad máxima se ha alcanzado en la curva de 5km de radio como ya hemos visto en el apartado de “*Discusión de los resultados del experimento 1*”.

Sin embargo, ahora vamos a analizar la evolución del valor de la velocidad máxima en la misma curva para diferentes valores de las constantes de rigidez y amortiguamiento.

Para comenzar, se observa que cuanto menor es la dureza de la suspensión, menor es el valor de la velocidad máxima. Las mayores variaciones de este parámetro se dan entre las modificaciones del -80% y -60%, donde la diferencia puede ser de hasta 15 m/s, como es el caso de la curva de 5km de radio. Sin embargo, a partir de la modificación del -60%, las variaciones no son considerables, como mucho 5 m/s. Además, a partir de la modificación del +40% hasta la del +100%, los valores de la velocidad máxima se mantienen constantes.

Por tanto, en teoría, a partir de la modificación del 40%, obtendríamos la misma velocidad máxima de circulación en curva. Sin embargo, al usar suspensiones duras, el confort de los viajeros se ve comprometido, ya que la variación de la longitud de los amortiguadores no es la misma a 40% que a 80%, aunque la velocidad máxima sea la misma. El problema de que la variación de longitud del amortiguador sea pequeña, es que cuando el vehículo circule por una curva, la caja no estará alineada con el suelo, sino que estará inclinada hacia el interior de dicha curva, lo que afecta a la comodidad del pasajero. Es por ello, que para elegir la suspensión adecuada debes tener en cuenta ambos factores, y, por tanto, garantizar la comodidad del trayecto a los viajeros circulando a la mayor velocidad posible.

En nuestro modelo de vehículo ferroviario, los valores de las constantes de amortiguación y rigidez son los del 0%, que garantizan una velocidad máxima de circulación y un confort al pasajero muy aceptables.

5.6 EXPERIMENTO 3

En este experimento, vamos a continuar con el análisis del componente “*Damper2Z*” de la suspensión secundaria de nuestro vehículo ferroviario. En este experimento estudiaremos la variación de la longitud de los amortiguadores a su paso por curvas de diferente amplitud, variando la posición del centro de masas de la caja del vehículo.

Para este experimento, los valores de las constantes de rigidez y amortiguación van a tomar el valor predeterminado, y el análisis se va a llevar a cabo para curvas de 1, 2 y 5 kilómetros de radio.

En cuanto a la velocidad, al igual que en el experimento 2, se ha establecido una **velocidad genérica** de valor 40 m/s, para la cual se va a realizar el análisis en detalle, ya que hacerlo para velocidades que vayan hasta la velocidad de descarrilamiento sería muy costoso. Sin embargo, se ha calculado y se analizará la velocidad máxima para cada uno de los casos que se van a estudiar.

Para el tercer experimento, vamos a cambiar la posición del centro de masas de la caja del vehículo en las direcciones de los ejes X, Y y Z. Para cada simulación, el centro de masas sólo va a variar en una dirección, es decir, o varía una determinada distancia en el eje X o en el eje Y o en el eje Z. No se ha decidido mover el centro de masas en más de una dirección ya que habría una enorme cantidad de posibilidades y llevaría mucho tiempo.

Para realizar la modificación del centro de masas, hemos ido añadiendo incrementos de distancia, en la dirección de interés, al centro de masas predeterminado, que se encuentra en la posición (0,0,0.538), en metros. En la siguiente tabla se muestran los diferentes incrementos, en metros, que se han añadido al centro de masas inicial según el eje.

Eje X	-10	Eje Y	-0.5
	-8		-0.25
	-6		+0
	-4		+0.25
	-2		+0.5
	0	Eje Z	+0
	+2		+0.25
	+4		+0.5
	+6		+0.75
	+8		+1
	+10		+1.25
			+1.5

Tabla 5.29: Tablas, en metros, de los incrementos en cada eje (Experimento 3).

Como podemos observar en las tablas anteriores, se van a realizar simulaciones variando la posición del centro de masas según incrementos de longitud en las tres direcciones.

- **Eje X:** para el eje X se van a realizar simulaciones en las que el centro de masas se va a desplazar desde 10 metros en sentido negativo del eje, hasta 10 metros en sentido positivo, con incrementos de 2 metros. Por tanto, hace un total de **11 simulaciones** variando el centro de masas sobre el eje X.
- **Eje Y:** en esta dirección el centro de masas va a variar desde 0.5 metros en sentido negativo del eje hasta 0.5 metros en sentido positivo. En este caso, se van a realizar incrementos de 0.25 metros, lo que hace un total de **5 simulaciones** variando el centro de masas sobre el eje Y.
- **Eje Z:** a lo largo del eje Z el centro de masas va a desplazarse hasta 1.5 metros de su posición inicial en sentido positivo del eje. Los intervalos van a ser, al igual que con el eje Y, de 0.25 metros. Por tanto, se van a realizar **7 simulaciones** variando el centro de masas sobre el eje Z.

De esta forma, para cada curva van a estudiarse 23 casos con el centro de masas ubicado en una posición diferente.

A continuación, se muestra una tabla con los valores de los parámetros que van a definir la geometría de nuestras curvas.

Eje X			
Parámetro	Curva 1km	Curva 2km	Curva 5km
L1	500	750	750
P11	250	500	1250
S1	1000	2000	5000
R1	1000	2000	5000
H1	0.09	0.09	0.09
P12	250	500	1250
L2	500	750	750
Recorrido total	2500	4500	9000

Tabla 5.30: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del eje X del experimento 3.

Eje Y			
Parámetro	Curva 1km	Curva 2km	Curva 5km
L1	1000	1000	1000
P11	250	500	1250
S1	1000	2000	5000
R1	1000	2000	5000
H1	0.09	0.09	0.09
P12	250	500	1250
L2	500	1000	1000
Recorrido total	3000	5000	9500

Tabla 5.31: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del eje Y del experimento 3.

Eje Z			
Parámetro	Curva 1km	Curva 2km	Curva 5km
L1	500	750	750
P11	250	500	1250
S1	1000	2000	5000
R1	1000	2000	5000
H1	0.09	0.09	0.09
P12	250	500	1250
L2	500	750	750
Recorrido total	2500	4500	9000

Tabla 5.32: Tabla de parámetros, en metros, de la geometría de las curvas del eje Z del experimento 3.

Si se analizan en las tablas, nos damos cuenta de que los valores de L1 y L2 varían de unas a otras. Esto se debe a que dependiendo de la dirección en la que se cambie el centro de masas, el vehículo necesitará más o menos distancia al arranque y al salir de la curva para filtrar las vibraciones y llegar a un estado de estabilidad.

Antes de comenzar a mostrar los resultados obtenidos para cada curva, se va a comentar el punto donde se han tomado los valores en este experimento, ya que varía dependiendo la dirección en la que desplazamos el centro de masas. El proceso de extracción de valores está explicado en el apartado “Parámetros seleccionados y proceso de análisis”. Sin embargo, con el fin de aclarar los puntos exactos de donde se han obtenido los datos de las tablas, se han elaborado unos gráficos como ejemplo.

Para el caso en el que el centro de masas se desplaza sobre el eje Z, los datos se extraen de igual manera que para los experimentos 1 y 2. Si se observa la siguiente figura, nos damos cuenta que sólo es necesario tomar un valor de la longitud de referencia, debido a que si se desplaza el centro de masas en vertical (eje Z), la simetría con respecto al plano en el que se encuentran los amortiguadores se mantiene. Por tanto, la carga se distribuye por igual entre los cuatro amortiguadores y el valor de referencia es similar para todos ellos.

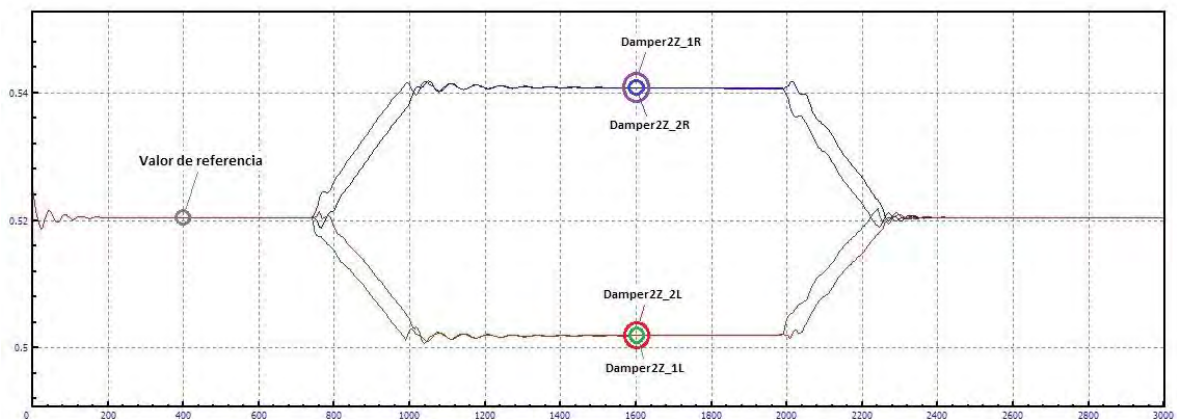


Figura 5.28: Puntos de extracción de los datos para desplazamiento en eje Z en experimento 3.

Sin embargo, cuando desplazamos el centro de masas en la dirección del eje Y, que es la dirección transversal al sentido de la marcha, la carga ya no se reparte por igual, ya que el centro de masas se ha desplazado hacia el interior o el exterior de la caja. De esta forma, los dos amortiguadores derechos o interiores tendrán un valor de longitud de referencia diferente al de los amortiguadores izquierdos o exteriores. A continuación, se muestra una gráfica de ejemplo en la que se ha desplazado el centro de masas en el eje Y, y se indican los puntos donde se han obtenido los datos para elaborar las tablas de resultados.

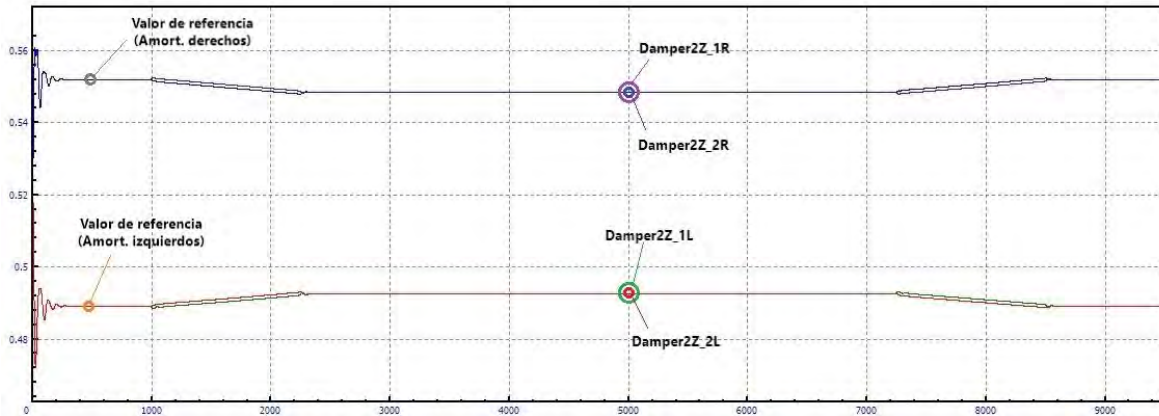


Figura 5.29: Puntos de extracción de los datos para desplazamiento en eje Y en experimento 3.

Por otro lado, si el desplazamiento se produce en dirección del eje X, que representa la dirección de la marcha (dirección longitudinal), ocurre algo similar que con el eje Y. Para este caso, el centro de masas se ha desplazado hacia delante o hacia atrás de la caja, provocando que la carga se reparta de forma desigual entre los amortiguadores delanteros y los traseros. Por tanto, los amortiguadores delanteros tendrán un valor de referencia diferente al de los traseros. A continuación, se muestra un gráfico explicativo donde se indican los puntos de extracción de datos.

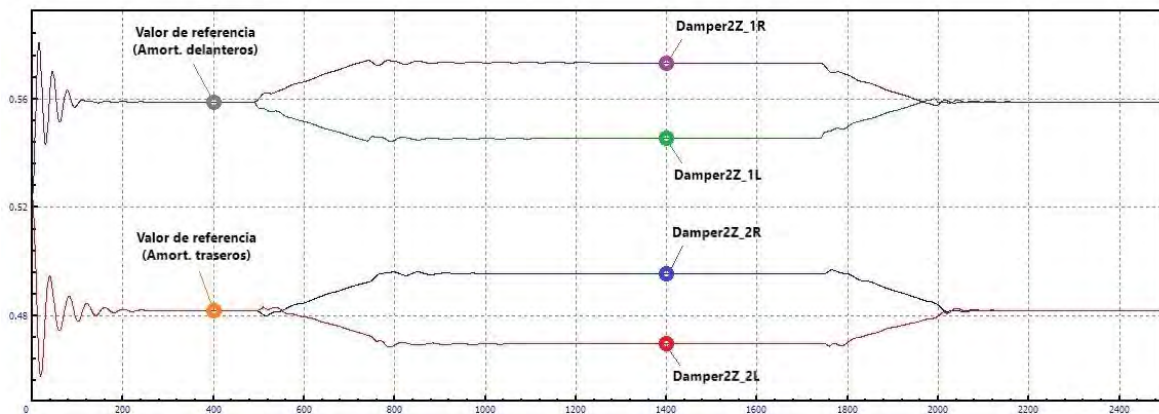


Figura 5.30: Puntos de extracción de los datos para desplazamiento en eje X en experimento 3.

5.6.1 CURVA 1KM

A continuación, se muestran las tablas con los resultados obtenidos cuando desplazamos el centro de masas en la dirección de los tres ejes. Las gráficas de las que se han extraído los datos de las siguientes tablas se encuentran en el apartado de “Anexos”.

***NOTA: Recordar que los datos de las tablas del experimento 3 se han obtenido para una velocidad genérica de valor 40 m/s.**

Eje Z					
Desplazamiento (m)	Valor de referencia (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
0	52.044	50.76	53.44	53.44	50.77
+0.25	52.044	50.39	53.83	53.84	50.39
+0.5	52.044	49.98	54.26	54.27	49.99
+0.75	52.044	49.56	54.71	54.72	49.56
+1	52.044	49.08	55.21	55.22	49.09
+1.25	52.044	48.59	55.74	55.75	48.6
+1.5	52.044	48.06	56.3	56.31	48.07

Tabla 5.33: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Z, curva 1km (Experimento 3).

Eje Y						
Desplazamiento (m)	V. ref. derechos (cm)	V. ref. izquierdos (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
+0.5	58.36	45.82	44.73	59.89	59.9	44.74
+0.25	55.2	48.92	47.72	56.67	56.68	47.73
0	52.04	52.04	50.76	53.44	53.44	50.77
-0.25	48.92	55.2	53.85	50.2	50.21	53.86
-0.5	45.82	58.36	56.99	46.98	46.98	56.99

Tabla 5.34: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Y, curva 1km (Experimento 3).

Eje X						
Desplazamiento (m)	V. ref. delanteros (cm)	V. ref. traseros (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-10	71.28	32.93	69.57	72.99	34.43	32.16
-8	67.44	36.72	65.8	69.05	38.07	35.75
-6	63.59	40.55	62.04	65.13	41.83	39.44
-4	59.74	44.37	58.3	61.22	45.67	43.2
-2	55.89	48.2	54.54	57.33	49.55	46.98
0	52.04	52.04	50.76	53.44	53.44	50.77
+2	48.2	55.89	46.97	49.54	57.34	54.55
+4	44.37	59.74	43.19	45.66	61.22	58.31
+6	40.55	63.59	39.43	41.81	65.13	62.05
+8	36.72	67.44	35.74	38.05	69.05	65.81
+10	32.93	71.28	32.14	34.4	73	69.58

Tabla 5.35: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en X, curva 1km (Experimento 3).

Analizando las tablas, se observa que ocurre lo que habíamos comentado anteriormente. La tabla de resultados del eje Z solo ha precisado de un valor de referencia, que se repite para todos los eventos, ya que el peso es el mismo siempre y se reparte de forma equitativa entre los cuatro amortiguadores. Sin embargo, para las tablas del eje X e Y, ha sido necesario obtener dos valores de referencia, el de los amortiguadores derechos e izquierdos en el caso del eje Y, y de los amortiguadores delanteros y traseros para el eje X, ya que cuando variamos el centro de masas en estas dos direcciones el reparto de carga entre los amortiguadores se produce de forma desigual.

Como se puede observar, en el desplazamiento de 0.5 metros del centro de masas en dirección Y se experimenta la mayor diferencia entre la longitud de los amortiguadores izquierdos y derechos, llegando a alcanzar 12.54 centímetros de diferencia. Por otro lado, cuando se desplaza en dirección X, la máxima diferencia entre las longitudes de los amortiguadores delanteros y traseros se registra cuando el centro de masas se desplaza 10 metros de su posición inicial, y alcanza 38.35 centímetros de diferencia.

Acto seguido, se muestran las tablas con la variación de longitud de cada amortiguador calculada. Sin embargo, en este experimento debemos prestar atención para realizar este cálculo, ya que debemos usar el valor de referencia correspondiente para cada amortiguador.

Eje Z				
Desplazamiento (m)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
0	-1.284	1.396	1.396	-1.274
+0.25	-1.654	1.786	1.796	-1.654
+0.5	-2.064	2.216	2.226	-2.054
+0.75	-2.484	2.666	2.676	-2.484
+1	-2.964	3.166	3.176	-2.954
+1.25	-3.454	3.696	3.706	-3.444
+1.5	-3.984	4.256	4.266	-3.974

Tabla 5.36: Variación de longitud en el eje Z en curva de R=1km (Experimento 3).

Eje Y				
Desplazamiento (m)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
+0.5	-1.09	1.53	1.54	-1.08
+0.25	-1.2	1.47	1.48	-1.19
0	-1.28	1.4	1.4	-1.27
-0.25	-1.35	1.28	1.29	-1.34
-0.5	-1.37	1.16	1.16	-1.37

Tabla 5.37: Variación de longitud en el eje Y en curva de R=1km (Experimento 3).

Eje X				
Desplazamiento (m)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-10	-1.71	1.71	1.5	-0.77
-8	-1.64	1.61	1.35	-0.97
-6	-1.55	1.54	1.28	-1.11
-4	-1.44	1.48	1.3	-1.17
-2	-1.35	1.44	1.35	-1.22
0	-1.28	1.4	1.4	-1.27
+2	-1.23	1.34	1.45	-1.34
+4	-1.18	1.29	1.48	-1.43
+6	-1.12	1.26	1.54	-1.54
+8	-0.98	1.33	1.61	-1.63
+10	-0.79	1.47	1.72	-1.7

Tabla 5.38: Variación de longitud en el eje X en curva de R=1km (Experimento 3).

Y, a continuación, a partir de las tablas se han elaborado los siguientes gráficos.

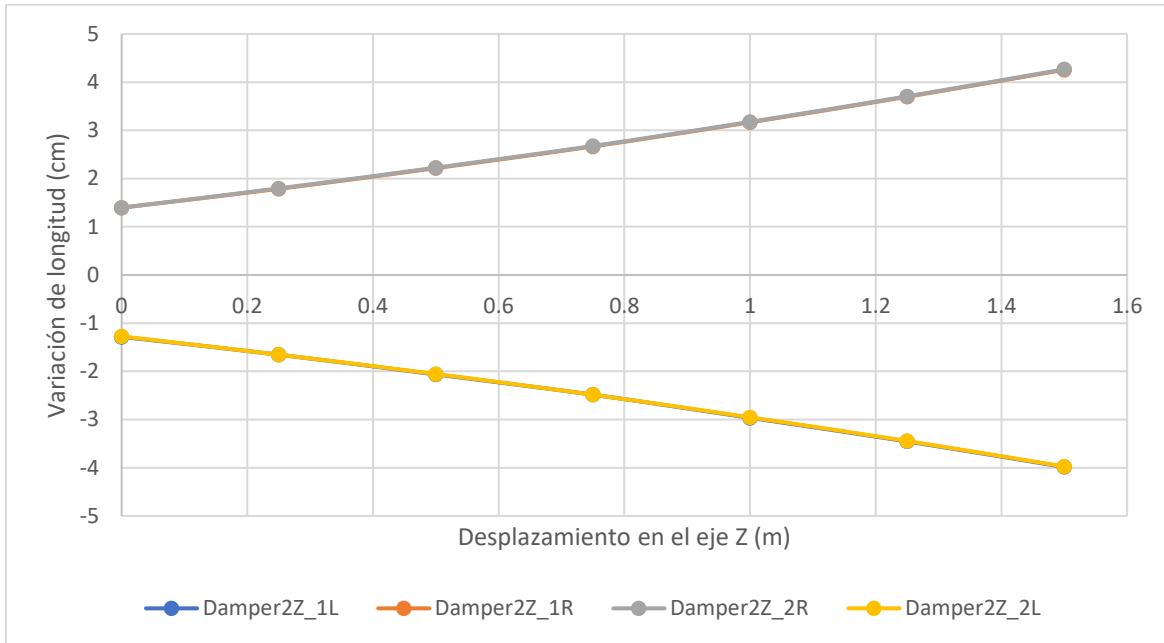


Figura 5.31: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Z en curva de 1km (Experimento 3).

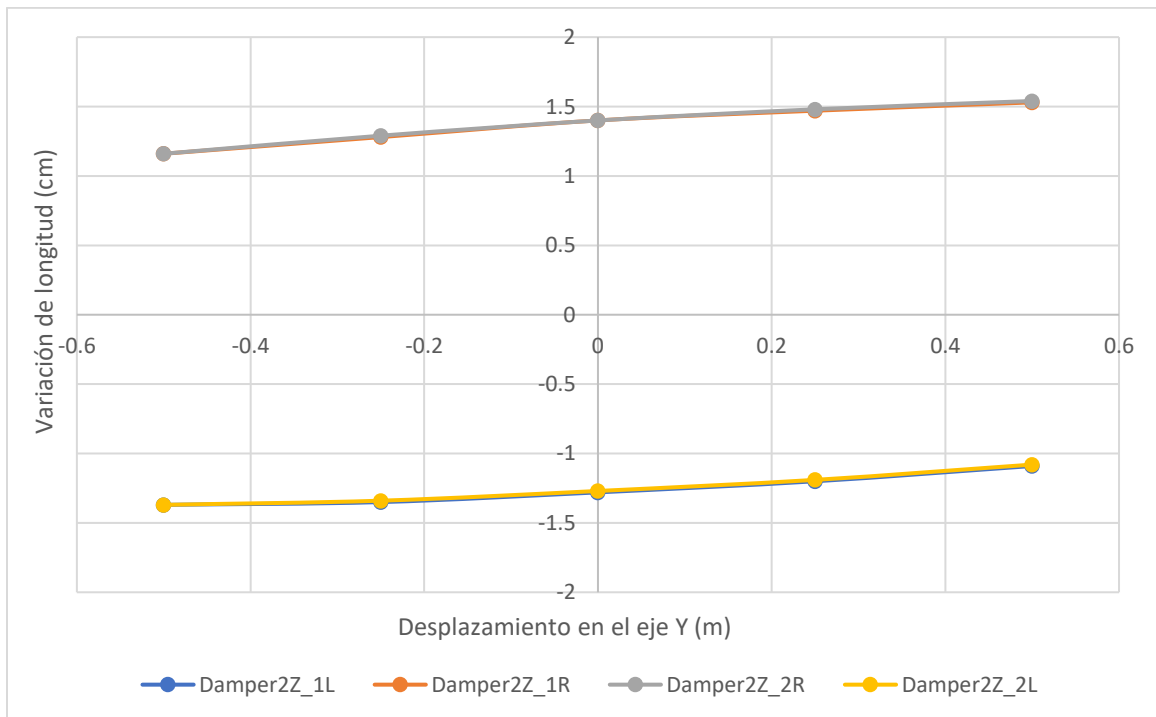


Figura 5.32: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Y en curva de 1km (Experimento 3).

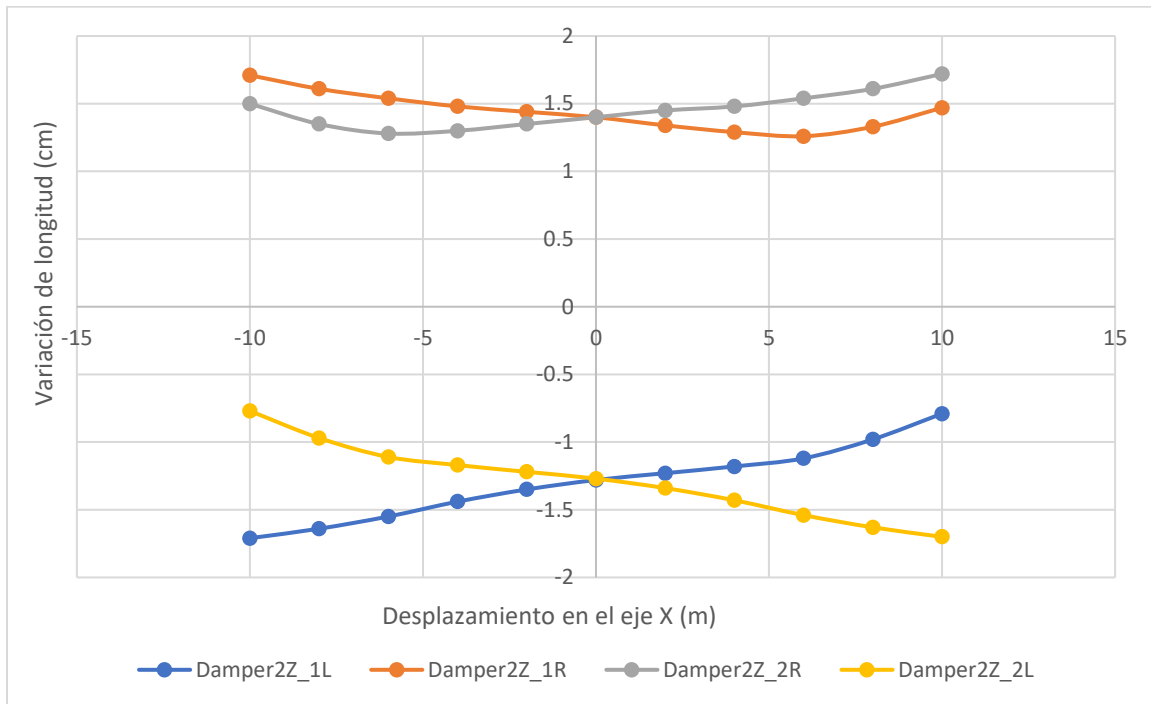


Figura 5.33: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje X en curva de 1km (Experimento 3).

Como se observa en los dos primeros gráficos, en los que el centro de masas se desplaza en dirección del eje Z e Y, nos encontramos con que las líneas están solapadas debido a un comportamiento idéntico entre los amortiguadores derechos y entre los izquierdos, al igual que nos ocurría en los dos experimentos anteriores. Sin embargo, en el tercer caso, en el que el centro de masas se mueve sobre el eje X, se observa que claramente cada amortiguador se comporta de forma diferente a los demás.

Por último, añadir que, en los tres gráficos, alcanzamos los valores máximos de compresión y alargamiento de los amortiguadores cuando la distancia entre la posición del centro de masas modificado y el centro de masas inicial es la mayor posible.

Por un lado, cuando el centro de masas se desplaza 1.5 metros en la dirección positiva del eje Z se alcanzan valores máximos de 3.984 cm y 4.266 cm a compresión y a tracción respectivamente. Luego, si el centro de masas se mueve 0.5 metros en dirección Y, se llegan a alcanzar 1.54 cm a tracción (sentido positivo del eje), y 1.37 cm a compresión (sentido negativo del eje). Por otro lado, los valores máximos en dirección X se alcanzan si desplazamos el centro de masas 10 metros, obteniendo 1.72 cm a tracción y 1.71 cm a compresión.

A continuación, se muestra una tabla con las velocidades máxima de circulación para cada uno de los casos estudiado en la curva de radio 1 kilómetro.

Modificación (m)	Velocidad máxima (m/s)
Eje X	
-10	65
-8	65
-6	65
-4	65
-2	65
0	65
+2	65
+4	65
+6	65
+8	65
+10	65

Modificación (m)	Velocidad máxima (m/s)
Eje Y	
-0.5	85
-0.25	75
0	65
+0.25	60
+0.5	45
Eje Z	
0	65
+0.25	65
+0.5	60
+0.75	55
+1	55
+1.25	50
+1.5	50

Tabla 5.39: Velocidades críticas para curva R=1km (Experimento 3).

5.6.2 CURVA 2KM

Las tablas que recogen los resultados obtenidos para la curva de 2km son los siguientes.

Eje Z					
Desplazamiento (m)	Valor de referencia (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
0	52.044	51.74	52.27	52.27	51.74
+0.25	52.044	51.66	52.35	52.35	51.66
+0.5	52.044	51.57	52.44	52.44	51.57
+0.75	52.044	51.48	52.53	52.53	51.48
+1	52.044	51.38	52.63	52.64	51.38
+1.25	52.044	51.27	52.74	52.75	51.27
+1.5	52.044	51.15	52.86	52.86	51.16

Tabla 5.40: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Z, curva 2km (Experimento 3).

Eje Y						
Desplazamiento (m)	V. ref. derechos (cm)	V. ref. izquierdos (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
+0.5	58.36	45.82	45.55	58.64	58.64	45.55
+0.25	55.2	48.92	48.62	55.45	55.45	48.63
0	52.04	52.04	51.74	52.27	52.27	51.74
-0.25	48.92	55.2	54.88	49.11	49.11	54.88
-0.5	45.82	58.36	58.04	45.98	45.98	58.04

Tabla 5.41: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Y, curva 2km (Experimento 3).

Eje X						
Desplazamiento (m)	V. ref. delanteros (cm)	V. ref. traseros (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-10	71.28	32.93	70.91	71.65	33.14	32.7
-8	67.44	36.72	67.08	67.78	36.91	36.47
-6	63.59	40.55	63.25	63.9	40.72	40.27
-4	59.74	44.37	59.41	60.02	44.55	44.08
-2	55.89	48.2	55.57	56.14	48.41	47.91
0	52.04	52.04	51.74	52.27	52.27	51.74
+2	48.2	55.89	47.9	48.4	56.15	55.57
+4	44.37	59.74	44.08	44.55	60.02	59.41
+6	40.55	63.59	40.26	40.71	63.9	63.25
+8	36.72	67.44	36.47	36.9	67.78	67.08
+10	32.93	71.28	32.7	33.12	71.65	70.91

Tabla 5.42: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en X, curva 2km (Experimento 3).

Como se ha comentado en la curva anterior, cuando el desplazamiento se produce en dirección Z, sólo es necesario un valor de referencia. Sin embargo, para las direcciones Z e Y, son necesarios dos valores de referencia para los amortiguadores derechos e izquierdos en el caso de Y, y para los delanteros y traseros en el caso Z.

La máxima diferencia entre estos dos valores de longitud de referencia en direcciones Z e Y, tienen lugar cuando el centro de masas está a la mayor distancia posible de su posición inicial, como hemos visto en la curva de 1km de radio. Además, la máxima diferencia entre los valores de referencia, coinciden con los de la primera curva, 12.54 centímetros cuando nos desplazamos 0.5 metros en Y, y 38.35 centímetros cuando lo hacemos en Z.

A continuación, se muestran las tablas con los resultados de la variación de longitud obtenidos para esta segunda curva.

Eje Z				
Desplazamiento (m)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
0	-0.304	0.226	0.226	-0.304
+0.25	-0.384	0.306	0.306	-0.384
+0.5	-0.474	0.396	0.396	-0.474
+0.75	-0.564	0.486	0.486	-0.564
+1	-0.664	0.586	0.596	-0.664
+1.25	-0.774	0.696	0.706	-0.774
+1.5	-0.894	0.816	0.816	-0.884

Tabla 5.43: Variación de longitud en el eje Z en curva de R=2km (Experimento 3).

Eje Y				
Desplazamiento (m)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
+0.5	-0.27	0.28	0.28	-0.27
+0.25	-0.3	0.25	0.25	-0.29
0	-0.3	0.23	0.23	-0.3
-0.25	-0.32	0.19	0.19	-0.32
-0.5	-0.32	0.16	0.16	-0.32

Tabla 5.44: Variación de longitud en el eje Y en curva de R=2km (Experimento 3).

Eje X				
Desplazamiento (m)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-10	-0.37	0.37	0.21	-0.23
-8	-0.36	0.34	0.19	-0.25
-6	-0.34	0.31	0.17	-0.28
-4	-0.33	0.28	0.18	-0.29
-2	-0.32	0.25	0.21	-0.29
0	-0.3	0.23	0.23	-0.3
+2	-0.3	0.2	0.26	-0.32
+4	-0.29	0.18	0.28	-0.33
+6	-0.29	0.16	0.31	-0.34
+8	-0.25	0.18	0.34	-0.36
+10	-0.23	0.19	0.37	-0.37

Tabla 5.45: Variación de longitud en el eje X en curva de R=2km (Experimento 3).

Seguidamente, se muestran los gráficos generados a partir de estas tablas.

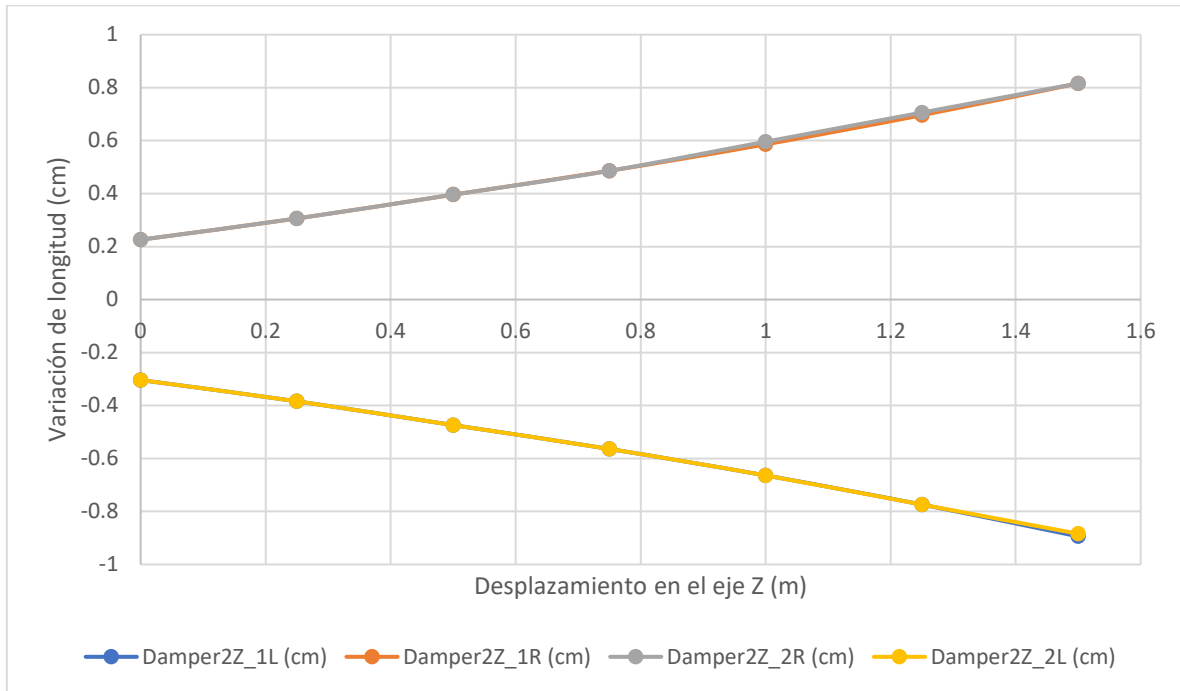


Figura 5.34: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Z en curva de 2km (Experimento 3).

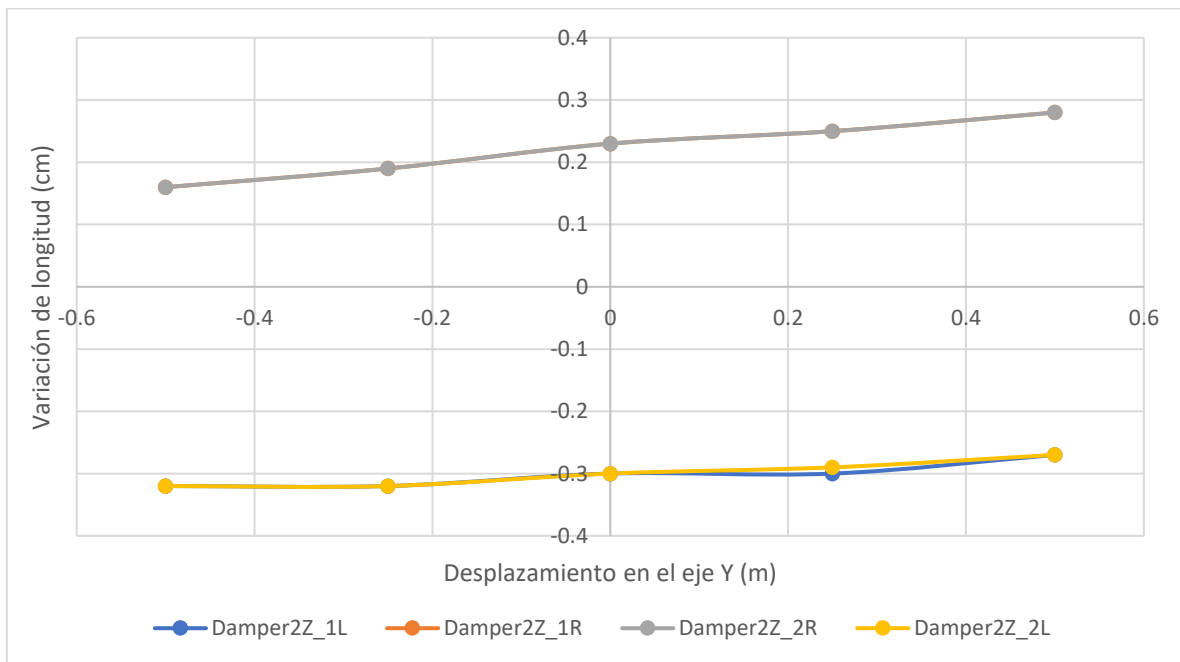


Figura 5.35: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Y en curva de 2km (Experimento 3).

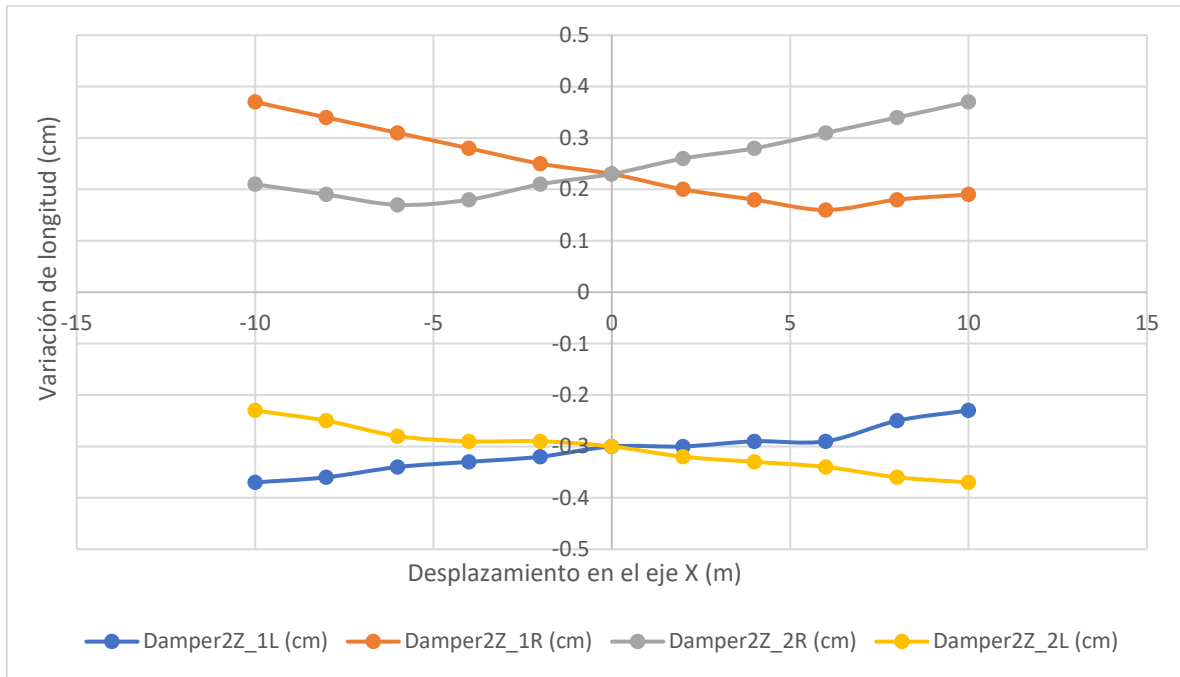


Figura 5.36: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje X en curva de 2km (Experimento 3).

Los gráficos en los que desplazamos en centro de masas en dirección Z e Y, aparecen las líneas solapadas debido a que el comportamiento de los amortiguadores es muy similar. Sin embargo, esto no ocurre en la última gráfica (eje X), en la que cada amortiguador presenta un comportamiento diferente al resto.

Además, se observa que cuando el centro de masas se desplaza 1.5 metros en la dirección positiva del eje Z se alcanzan valores máximos de 0.894 cm y 0.816 cm a compresión y a tracción respectivamente. Por un lado, si el centro de masas se mueve 0.5 metros en dirección Y, se llegan a alcanzar 0.28 cm a tracción (sentido positivo del eje), y 0.32 cm a compresión (sentido negativo del eje). Por otro lado, los valores máximos en dirección X se alcanzan si desplazamos el centro de masas 10 metros, obteniendo 0.37 cm a tracción y a compresión.

Por último, se muestra una tabla recogiendo el valor de la velocidad máxima de circulación por la curva de 2km de radio para cada uno de los casos estudiados.

Modificación (m)	Velocidad máxima (m/s)
Eje X	
-10	80
-8	95
-6	95
-4	95
-2	95
0	95
+2	95
+4	95
+6	95
+8	95
+10	95

Modificación (m)	Velocidad máxima (m/s)
Eje Y	
-0.5	120
-0.25	110
0	95
+0.25	85
+0.5	70
Eje Z	
0	95
+0.25	90
+0.5	85
+0.75	80
+1	75
+1.25	75
+1.5	70

Tabla 5.46: Velocidades críticas para curva R=2km (Experimento 3).

5.6.3 CURVA 5KM

Los resultados obtenidos de las simulaciones para la curva de 5km radio se presentan en las tablas que aparecen a continuación.

Eje Z					
Desplazamiento (m)	Valor de referencia (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
0	52.044	52.41	51.72	51.71	52.41
+0.25	52.044	52.51	51.62	51.61	52.52
+0.5	52.044	52.63	51.51	51.5	52.63
+0.75	52.044	52.75	51.39	51.39	52.75
+1	52.044	52.88	51.26	51.26	52.88
+1.25	52.044	53.02	51.12	51.12	53.02
+1.5	52.044	53.17	50.97	50.97	53.17

Tabla 5.47: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Z, curva 5km (Experimento 3).

Eje Y						
Desplazamiento (m)	V. ref. derechos (cm)	V. ref. izquierdos (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
+0.5	58.36	45.82	46.12	57.99	58	46.12
+0.25	55.2	48.92	49.25	54.85	54.84	49.25
0	52.04	52.04	52.41	51.72	51.72	52.41
-0.25	48.92	55.2	55.58	48.62	48.62	55.59
-0.5	45.82	58.36	58.77	45.57	45.57	58.77

Tabla 5.48: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en Y, curva 5km (Experimento 3).

Eje X						
Desplazamiento (m)	V. ref. delanteros (cm)	V. ref. traseros (cm)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-10	71.28	32.93	71.73	70.83	32.78	33.34
-8	67.44	36.72	67.87	67	36.54	37.09
-6	63.59	40.55	64.01	63.18	40.32	40.88
-4	59.74	44.37	60.4	59.35	44.11	44.71
-2	55.89	48.2	56.27	55.54	47.91	48.55
0	52.04	52.04	52.41	52.41	51.72	51.72
+2	48.2	55.89	48.55	47.91	55.53	56.28
+4	44.37	59.74	44.71	44.11	59.35	60.14
+6	40.55	63.59	40.88	40.32	63.18	64.01
+8	36.72	67.44	37.09	36.54	67	67.87
+10	32.93	71.28	33.33	32.79	70.84	71.72

Tabla 5.49: Resultados de la variación de longitud, desplazamiento en X, curva 5km (Experimento 3).

Si se observan las tablas, se aprecia que vuelve a ocurrir lo mismo que en las dos curvas anteriores, tenemos un único valor de referencia para la tabla en la que el desplazamiento del centro de masas es en dirección Z, y dos valores de referencia para las direcciones Y (derecho e izquierdo) y X (delantero y trasero).

La diferencia más amplia entre estos dos valores de longitud de referencia para las direcciones Z e Y, tienen lugar cuando el centro de masas está a la mayor distancia posible de su posición inicial, como hemos visto en las curvas anteriores. La máxima diferencia entre los valores de referencia, coinciden con los de las curvas anteriores, se registraban 12.54 centímetros cuando el centro de masas se desplazaba 0.5 metros en Y, y 38.35 centímetros cuando lo hacemos en Z.

Seguidamente, se muestran las tablas con los resultados de la variación de longitud obtenidos para la curva de 5km de radio.

Eje Z				
Desplazamiento (m)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
0	0.366	-0.324	-0.334	0.366
+0.25	0.466	-0.424	-0.434	0.476
+0.5	0.586	-0.534	-0.544	0.586
+0.75	0.706	-0.654	-0.654	0.706
+1	0.836	-0.784	-0.784	0.836
+1.25	0.976	-0.924	-0.924	0.976
+1.5	1.126	-1.074	-1.074	1.126

Tabla 5.50: Variación de longitud en el eje Z en curva de R=5km (Experimento 3).

Eje Y				
Desplazamiento (m)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
+0.5	0.3	-0.37	-0.36	0.3
+0.25	0.33	-0.35	-0.36	0.33
0	0.37	-0.32	-0.32	0.37
-0.25	0.38	-0.3	-0.3	0.39
-0.5	0.41	-0.25	-0.25	0.41

Tabla 5.51: Variación de longitud en el eje Y en curva de R=5km (Experimento 3).

Eje X				
Desplazamiento (m)	Damper2Z_1L (cm)	Damper2Z_1R (cm)	Damper2Z_2R (cm)	Damper2Z_2L (cm)
-10	0.45	-0.45	-0.15	0.41
-8	0.43	-0.44	-0.18	0.37
-6	0.42	-0.41	-0.23	0.33
-4	0.66	-0.39	-0.26	0.34
-2	0.38	-0.35	-0.29	0.35
0	0.37	0.37	-0.32	-0.32
+2	0.35	-0.29	-0.36	0.39
+4	0.34	-0.26	-0.39	0.4
+6	0.33	-0.23	-0.41	0.42
+8	0.37	-0.18	-0.44	0.43
+10	0.4	-0.14	-0.44	0.44

Tabla 5.52: Variación de longitud en el eje X en curva de R=5km (Experimento 3).

Estos son los gráficos obtenidos de las tablas anteriores.

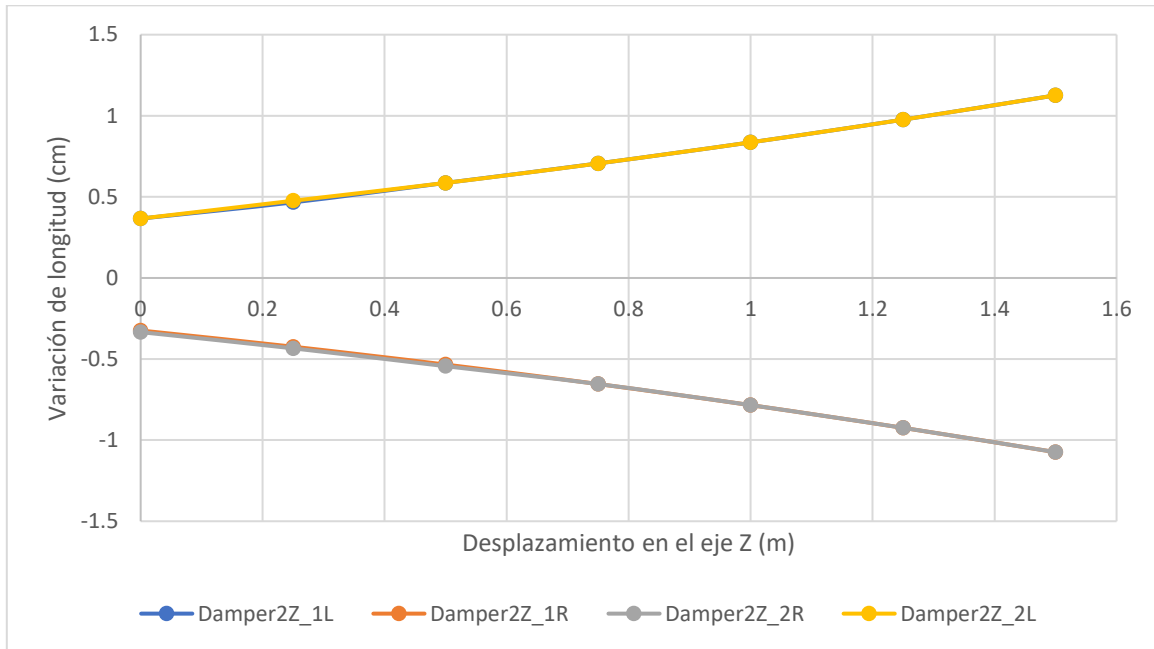


Figura 5.37: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Z en curva de 5km (Experimento 3).

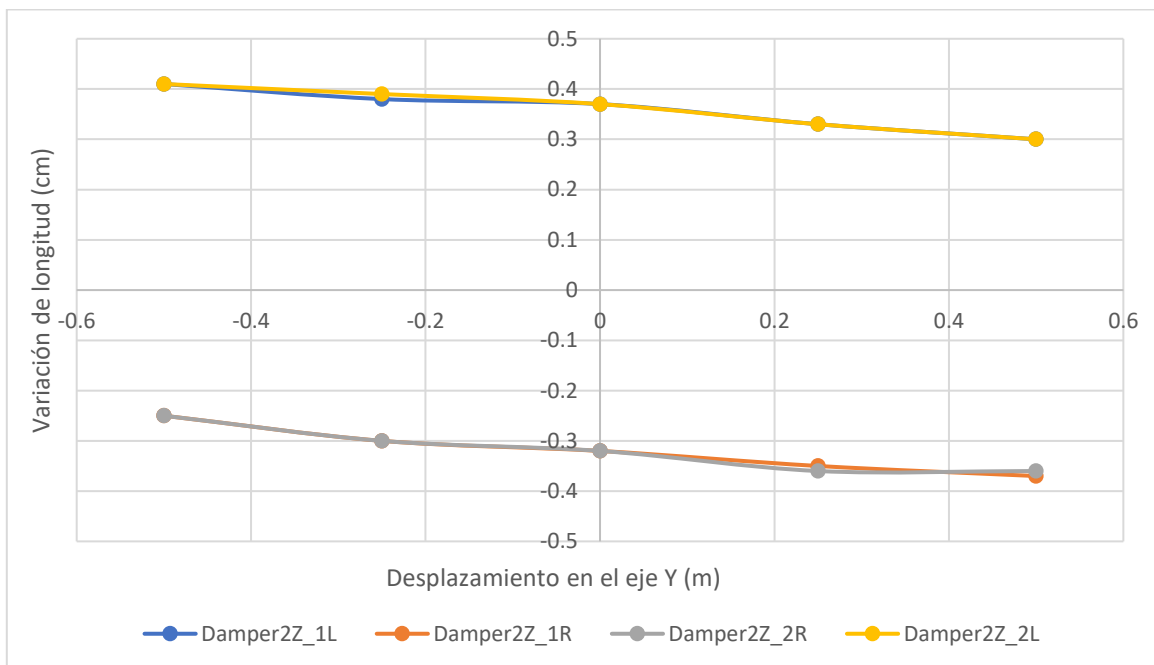


Figura 5.38: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Y en curva de 5km (Experimento 3).

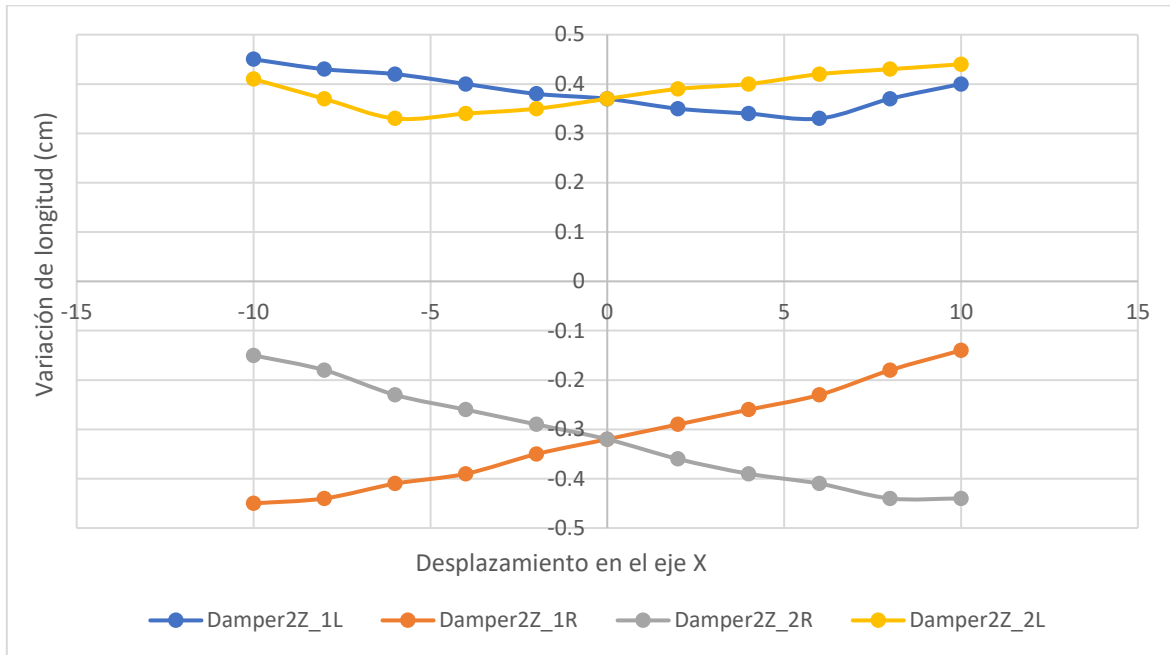


Figura 5.39: Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje X en curva de 5km (Experimento 3).

Al igual que en las graficas de las curvas anteriores, encontramos solapamiento de las líneas de tendencia en los gráficos Z e Y, mientras que en el último que se corresponde al desplazamiento del centro de masas sobre el eje X, no ocurre este solapamiento ya que los amortiguadores se comportan de manera diferente en este caso.

Analizando los gráficos, se aprecia que cuando el centro de masas se desplaza 1.5 metros en la dirección positiva del eje Z se alcanzan valores máximos de 1.074 cm y 1.126 cm a compresión y a tracción respectivamente. Además, si el centro de masas se mueve 0.5 metros en dirección Y, se llegan a alcanzar 0.37 cm a compresión (sentido positivo del eje), y 0.41 cm a tracción (sentido negativo del eje). También, los valores máximos en dirección X se alcanzan si desplazamos el centro de masas 10 metros, obteniendo 0.44 cm tanto a tracción como a compresión.

Finalmente, se muestra una tabla recogiendo el valor de la velocidad máxima de circulación por la curva de 5km de radio para cada uno de los casos estudiados.

Modificación (m)	Velocidad máxima (m/s)
Eje X	
-10	95
-8	140
-6	150
-4	150
-2	150
0	155
+2	150
+4	150
+6	150
+8	150
+10	105

Modificación (m)	Velocidad máxima (m/s)
Eje Y	
-0.5	175
-0.25	175
0	155
+0.25	135
+0.5	110
Eje Z	
0	155
+0.25	145
+0.5	135
+0.75	130
+1	125
+1.25	115
+1.5	110

Tabla 5.53: Velocidades críticas para curva $R=5\text{km}$ (Experimento 3).

5.6.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 3

A lo largo de este apartado vamos a comparar y discutir los resultados obtenidos para cada una de las curvas en las que se ha llevado a cabo el experimento.

Para empezar, analizaremos las gráficas según la dirección en la que se ha desplazado el centro de masas.

5.6.4.1 DESPLAZAMIENTO EN DIRECCIÓN Z

Comenzamos estudiando las gráficas en las que el centro de masas se ha desplazado en dirección Z, es decir, verticalmente con respecto a su posición inicial. Como se puede observar, vuelve a tener lugar el problema del solapamiento de las líneas de tendencia, al igual que en experimentos anteriores. La razón de que fenómeno se debe a que el centro de masas pertenece al plano YZ, que es perpendicular a la dirección de avance del vehículo y se encuentra en el punto medio de la caja. Esto provoca que los amortiguadores derechos tengan un comportamiento muy similar, es decir, que se estiren y se compriman casi lo mismo, y lo mismo ocurre con los amortiguadores izquierdos, de ahí que se solapen las líneas de tendencia.

En cuanto a la tendencia de los valores de las gráficas, se observa que cuanto mayor es el valor del desplazamiento en el eje Z, mayor es el valor de la variación de longitud de los amortiguadores, tanto a compresión como a tracción. La explicación a este suceso tiene que ver con el momento generado por la fuerza centrífuga y el peso del vehículo.

Cuando el centro de masas del vehículo se desplaza a una posición más alta que su posición original, el momento que generan las fuerzas que intervienen durante el paso por curva (fuerza centrífuga y peso) aumentan, debido a que la distancia entre el centro de masas y los amortiguadores es mayor. A continuación, se va a mostrar una imagen para aclarar este concepto. En la imagen se han representado las fuerzas que actúan en el centro de masas en distintas posiciones a lo largo de la dirección Z cuando el vehículo circula por una curva peraltada.

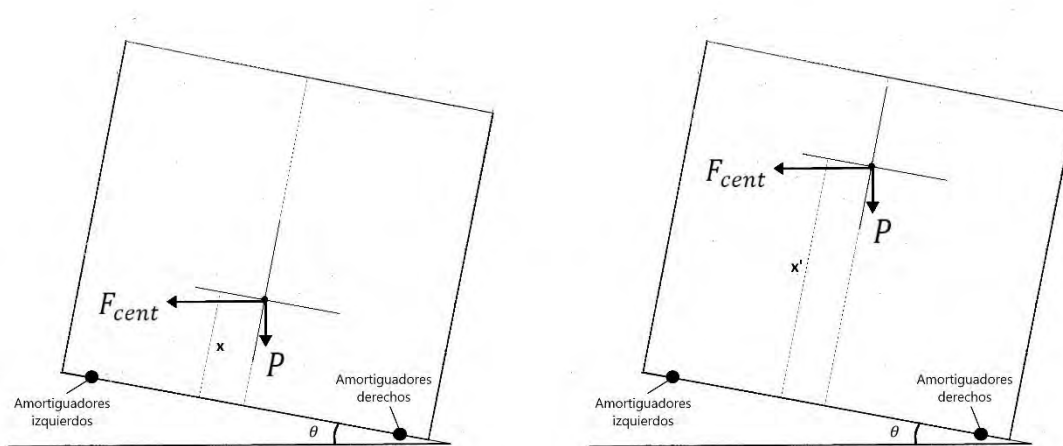


Figura 5.40: Fuerzas que actúan en curva sobre el CM a lo largo de la dirección Z (Vista posterior del vehículo).

Como se puede apreciar en la imagen, la distancia x' es mayor que la distancia x , por tanto, el momento generado por las fuerzas en el caso en el que el centro de masas se encuentra en una posición elevado es mayor. Si se analizan las gráficas del eje Z, se ve claramente como el valor de la variación de longitud de los amortiguadores es mayor cuanto más alto se encuentra el centro de masas.

Además, observando las gráficas, se observa que para las curvas de 1 y 2 kilómetros de radio, los amortiguadores izquierdos se encuentran a compresión y los derechos estirados, mientras que para la curva de 5km de radio ocurre lo contrario. Como ya se ha comentado en la discusión de resultados del experimento 2, esto se debe a que la fuerza centrífuga es inversamente proporcional al radio de curvatura, por tanto, para la curva de 5km de radio, el momento creado por la fuerza centrífuga no es lo suficientemente grande como para vencer al generado por el peso. De esta forma, para la curva de 5km los amortiguadores derechos se encuentran trabajando a compresión y los izquierdos a tracción.

Seguidamente, se muestra un gráfico los valores obtenidos de la variación de longitud de los amortiguadores cuando el centro de masas se desplaza en dirección Z en cada una de las curvas, con el fin de reafirmar los eventos de los que hemos hablado anteriormente.

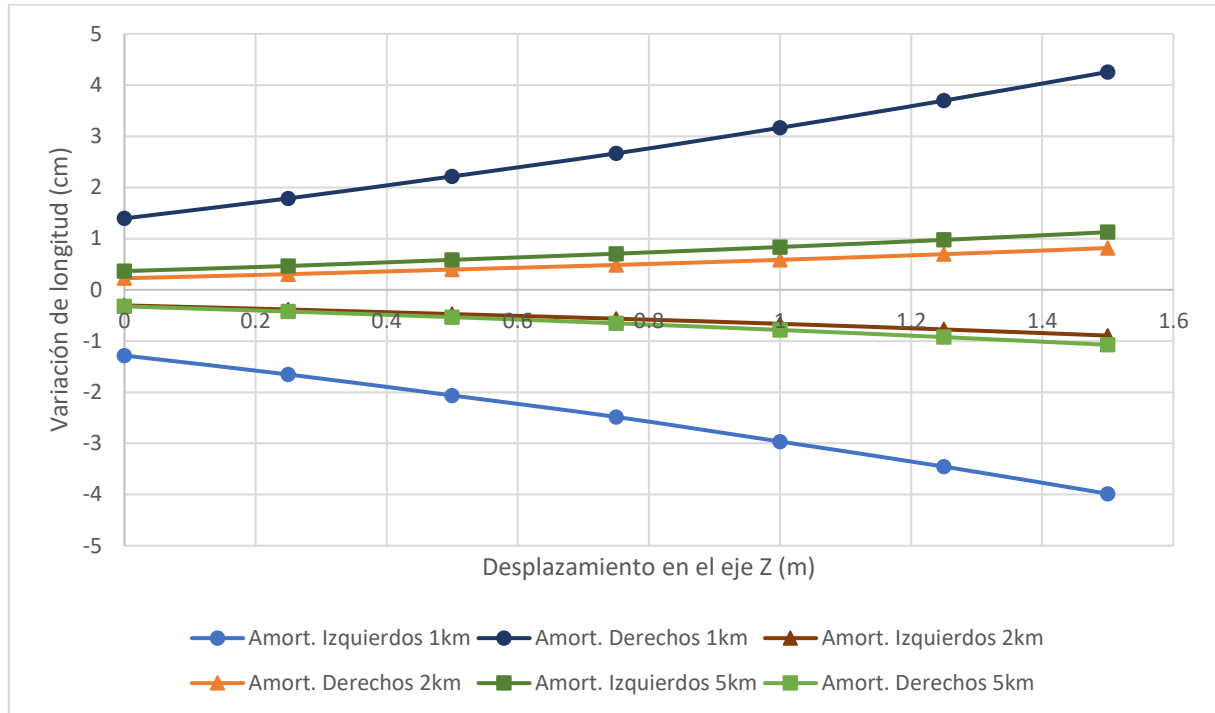


Figura 5.41: Comparación de Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Z (Experimento 3).

Como se observa en el gráfico, los valores más altos de variación de longitud en los amortiguadores, tienen lugar en la curva más cerrada, la de 1km de radio. Se registran valores máximos de 3.984 cm y 4.266 cm a compresión y a tracción respectivamente.

A continuación, vamos a analizar los valores obtenidos de la velocidad máxima de circulación en curva para las tres curvas cuando el centro de masas se ha desplazado en dirección Z. Se obtiene el siguiente gráfico.

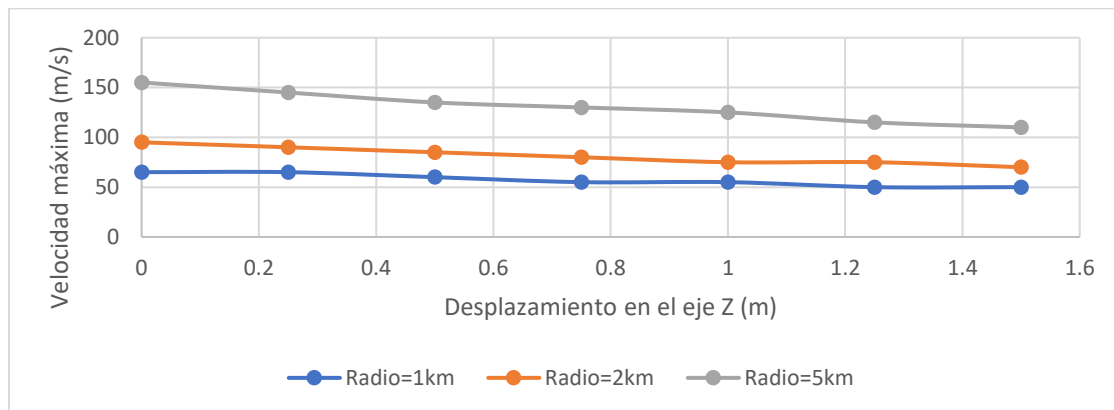


Figura 5.42: Comparación de las velocidades máximas (Dirección Z).

Analizando el gráfico, vemos que las velocidades más elevadas se alcanzan en la curva de 5km. Este hecho ya ha sido comentado en el experimento 1, y se explicó que cuanto mayor es la amplitud de la curva, mayor era la velocidad máxima de circulación. En este gráfico, vamos a analizar como varía la velocidad máxima según la posición del centro de masas a lo largo del eje Z. Como se aprecia, cuanto más elevada sea la posición del centro de masas, menor es la velocidad máxima y, por tanto, antes descarrilará el vehículo. Este evento tiene que ver también con el momento generado por la fuerza centrífuga, ya que cuanto más alto se encuentre el centro de masas, mayor momento generará la fuerza centrífuga, provocando el descarrilamiento a velocidades más bajas. La mayor diferencia de las velocidades máximas entre el punto más bajo y el más alto del centro de masas se registra en la curva de 5km de radio, cuya diferencia es de 45 m/s. Luego le sigue la curva de 2km con una diferencia de 25 m/s. Y, finalmente, la curva de 1km de radio, con una diferencia de valor 15 m/s.

Esto sería todo con respecto al análisis del comportamiento de los amortiguadores cuando el centro de masas se desplaza en dirección Z. Ahora, procederemos a estudiar el comportamiento cuando el desplazamiento ocurre en dirección Y.

5.6.4.2 DESPLAZAMIENTO EN DIRECCIÓN Y

Al igual que ocurre cuando desplazamos el centro de masas en dirección Z, si éste se desplaza en dirección Y, se observa que las líneas de tendencia de los amortiguadores derechos y de los izquierdos se solapan. Como hemos comentado previamente, esto se debe a que el centro de masas se encuentra en el plano YZ, es decir, en el plano perpendicular al sentido de la marcha y en el punto medio del vehículo. Esto provoca un comportamiento similar en los amortiguadores derechos e izquierdos.

Además, como se ha podido observar, para este caso partimos de dos valores de referencia, uno para los amortiguadores derechos y otro para los izquierdos, ya que, al desplazar el centro de masas en dirección transversal al sentido de la marcha, la carga no está uniformemente repartida entre la parte derecha y la izquierda del vehículo.

En el caso de que desplazemos el centro de masas hacia el interior de la curva (sentido negativo del eje Y), se observa que los amortiguadores izquierdos se comprimen y los derechos se estiran. Además, se aprecia que la compresión que experimentan los amortiguadores izquierdos es mayor que el estiramiento de los derechos. La razón a este suceso se debe a que el momento generado por las fuerzas que actúan durante la curva, que son la fuerza centrífuga y el peso del vehículo, es mayor en los amortiguadores izquierdos que en los derechos, ya que la distancia de los primeros (izquierdos) al centro de masas es mayor que la de los segundos (derechos).

Sin embargo, debemos recordar que los cálculos que estamos realizando en este proyecto miden la variación entre la longitud de los amortiguadores de un vehículo a su paso por curva con respecto al valor de referencia tomado en un tramo recto cuando el vehículo se

ha estabilizado. Por tanto, a pesar de obtener una mayor compresión en los amortiguadores izquierdos o exteriores cuando el centro de masas se encuentra desplazado hacia el interior de la curva, no significa que la longitud total de éstos sea menor que la de los amortiguadores derechos, que se estiran. Es más, como se aprecia en las tablas de resultados, los amortiguadores derechos presentan una longitud total menor que los izquierdos ya que soportan más carga.

Por el contrario, si el centro de masas se desplaza hacia el exterior de la curva, los amortiguadores derechos experimentarán una variación de longitud a tracción mayor que los amortiguadores izquierdos a compresión, por el hecho de que en este caso el momento que actúa sobre los amortiguadores derechos es mayor.

En la imagen que se muestra a continuación, aparecen estos dos casos de los que hemos hablado anteriormente, con el objetivo de reafirmar nuestro razonamiento y ayudar a comprender mejor el comportamiento de los amortiguadores. En la imagen se han representado las fuerzas que actúan en el centro de masas en distintas posiciones a lo largo de la dirección Y cuando el vehículo circula por una curva peraltada.

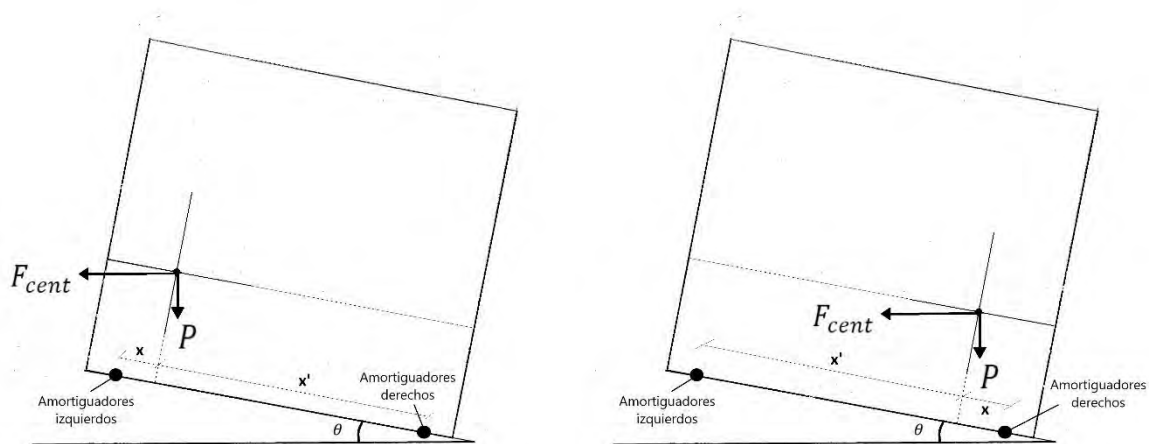


Figura 5.43: Fuerzas que actúan en curva sobre el CM a lo largo de la dirección Y (Vista posterior del vehículo).

Como se puede apreciar en la imagen, la distancia x' es mayor que la distancia x , de esta manera, el momento que actúa en los amortiguadores derechos cuando el centro de masas esta desplazado hacia el exterior es mayor que el que actúa en los izquierdos (imagen de la izquierda). Y, por el contrario, si el centro de masas se desplaza hacia el interior, los amortiguadores izquierdos sufren un momento mayor.

Anteriormente, hemos visto que en la curva de 5km de radio, el momento generado por el peso del vehículo es mayor que el creado por la fuerza centrífuga. Para este caso, ocurre exactamente igual, los amortiguadores derechos trabajan a compresión y los izquierdos a

tracción para la curva de 5km, mientras que para las curvas de 1 y 2 kilómetros de radio ocurre lo contrario.

A continuación, se muestra un gráfico que permite comparar la variación de la longitud de los amortiguadores en la tres curva cuando el centro de masas de ha desplazado en dirección Y.

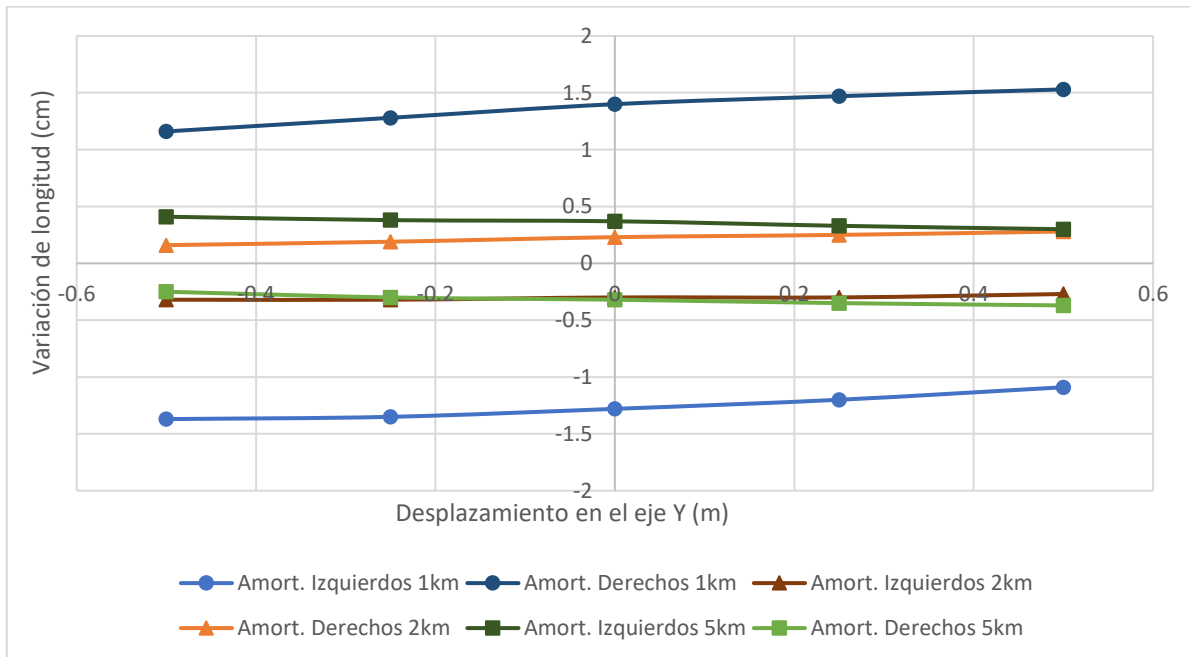


Figura 5.44: Comparación de Variación de longitud VS Desplazamiento en el eje Y (Experimento 3).

En lo que se refiere a las gráficas, se observa que cuando más lejos de la posición inicial se encuentra el centro de masas, se alcanzan los valores máximos de compresión y alargamiento de los amortiguadores. Se han registrado valores máximos de 1.54 cm a tracción (sentido positivo del eje), y 1.37 cm a compresión (sentido negativo del eje).

Seguidamente, vamos a proceder a estudiar la evolución de los valores de la velocidad máxima según la posición del dentro de masas a lo largo del eje Y. A continuación, se muestra un gráfico que recoge las velocidades máximas registradas en cada posición del eje Y para las tres curvas.

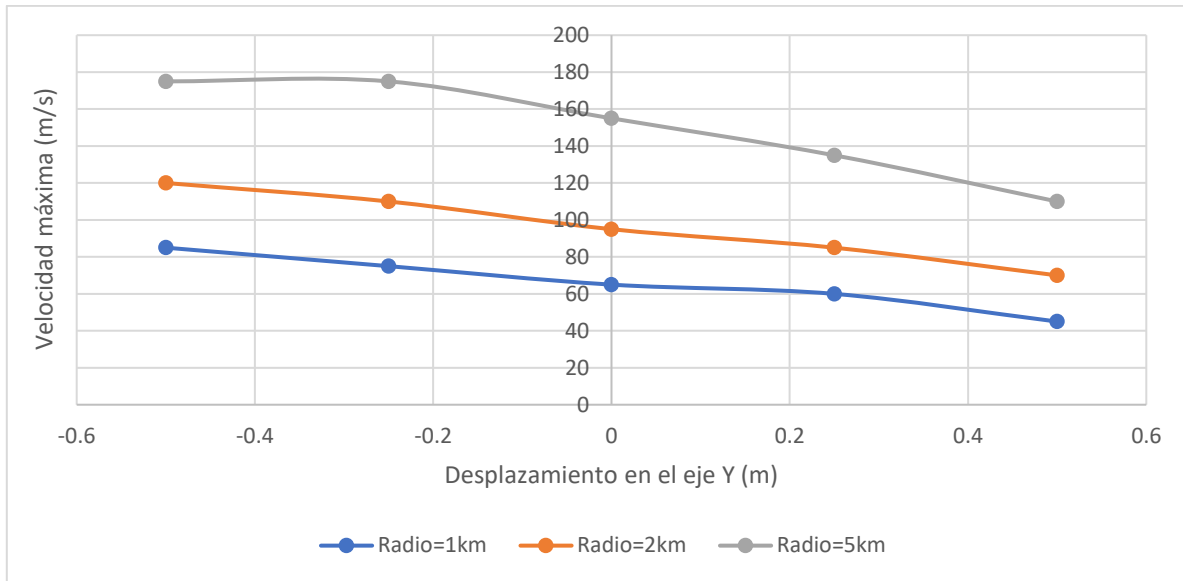


Figura 5.45: Comparación de las velocidades máximas (Dirección Y).

Observando el gráfico, se puede comprobar que al igual que hemos comentado en el apartado anterior, y explicado en el experimento 1, la velocidad máxima se alcanza en la curva más amplia, es decir, la curva de 5km de radio. Sin embargo, lo que vamos a analizar en este caso, es la evolución de estos valores según desplazamos el centro de masas a lo largo de la dirección Y.

La velocidad máxima más alta se obtiene cuando la posición del centro de masas se encuentra desplazado hacia el interior de la curva. La respuesta a esta cuestión tiene que ver con el momento generado por la fuerza centrífuga. Cuando el centro de masas se encuentra desplazado hacia el interior, el riesgo de vuelco hacia el exterior de la curva es menor que si el centro de masas estuviese centrado o desplazado hacia el exterior, ya que el momento que actúa sobre los amortiguadores interiores es más pequeño. Por tanto, cuanto mayor sea el desplazamiento hacia el interior del centro de masas, menor momento actuará sobre los amortiguadores interiores, lo que permitirá circular a velocidades más altas antes de que se produzca el vuelco.

Si comparamos la diferencia entre la velocidad máxima cuando el centro de masas se desplaza hacia el interior o el exterior, obtenemos 65 m/s de diferencia para la curva de 5km de radio, 50 m/s para la de 2km y 40 m/s para la de 1km.

Como se ha podido comprobar, el vehículo es más sensible a variaciones del centro de masa en dirección Y que en dirección Z.

5.6.4.3 DESPLAZAMIENTO EN DIRECCIÓN X

Para este caso, en el que el centro de masas se desplaza en dirección X (dirección del sentido de la marcha), se observa que ocurre lo mismo que cuando desplazábamos el centro de masas en dirección Y, y es que partimos de dos valores de referencia diferentes ya que la carga no está uniformemente distribuida. Por tanto, debemos distinguir entre el valor de la longitud de referencia, uno para los amortiguadores delanteros y otro para los traseros.

A diferencia de los otros casos, cuando el centro de masas se desplaza en dirección X no se aprecian solapamientos en ninguna de las gráficas obtenidas. De esta forma, cada amortiguador tiene un comportamiento diferente al resto. La razón de este suceso tiene que ver con distribución del peso y los momentos generados durante la curva. Además, el centro de masas ya no se encuentra en el punto medio del vehículo, por lo que para este caso no existe simetría como en los anteriores.

A continuación, se va a proceder a explicar las razones que llevan a cada amortiguador a comportarse de forma diferente al resto.

Como ya hemos comentado previamente, los amortiguadores delanteros y traseros parten de valores de referencia diferentes, ya que la carga no se reparte uniformemente. Además, cuando el vehículo se encuentra circulando por una curva, los amortiguadores exteriores trabajarán a compresión y los interiores experimentarán un alargamiento debido a la actuación de la fuerza centrífuga. De esta forma, cada amortiguador tiene un comportamiento diferente.

Si se analizan las gráficas, se distingue cómo varía la longitud de cada amortiguación según la posición del centro de masas a lo largo de la dirección X. Cuando el centro de masas se encuentra en la parte delantera del vehículo, figura 5.46 (inferior), se observa cómo debido a la acción del momento generado por la fuerza centrífuga y el peso, que empujan el vehículo hacia el exterior de la curva, los amortiguadores izquierdos se comprimen, mientras que los derechos se estiran. Sin embargo, el amortiguador trasero izquierdo sufre una compresión mayor que el amortiguador delantero izquierdo, debido a que el momento generado por el peso y la fuerza centrífuga es mayor en la parte trasera que en la delantera. Lo mismo ocurre con los amortiguadores derechos, que trabajan ambos a tracción, pero el trasero se estira más debido a que sobre él actúa un momento con un valor mayor que sobre el delantero.

Al igual que hemos comentado en el apartado anterior, debemos tener en cuenta que los cálculos que estamos realizando en este proyecto miden la variación entre la longitud de los amortiguadores de un vehículo a su paso por curva con respecto al valor de referencia tomado en un tramo recto cuando el vehículo se ha estabilizado. Por tanto, a pesar de experimentar una mayor compresión en el amortiguador trasero izquierdo cuando el centro de masas se encuentra desplazado hacia la parte delantera del vehículo, no significa que la longitud total de éste amortiguador sea menor que la del delantero izquierdo, que

experimenta una compresión menor. Es más, como se aprecia en las tablas de resultados, el amortiguador delantero izquierdo presenta una longitud total menor que el trasero izquierdo ya que soporta más carga.

De igual manera, si el centro de masas se desplaza hacia la parte posterior del vehículo, figura 5.46 (superior), los amortiguadores izquierdos trabajarán a compresión y los derechos a tracción debido a la fuerza centrífuga. Sin embargo, ahora los amortiguadores delanteros sufrirán una mayor variación de longitud puesto que el momento que actúa sobre ellos es mayor.

En la siguiente imagen se puede apreciar de forma más clara y visual este fenómeno que acabamos de comentar. Aparece un dibujo de la caja del vehículo visto desde el interior de la curva junto con las fuerzas que actúan sobre el centro de masas para distintas posiciones a lo largo de la dirección X.

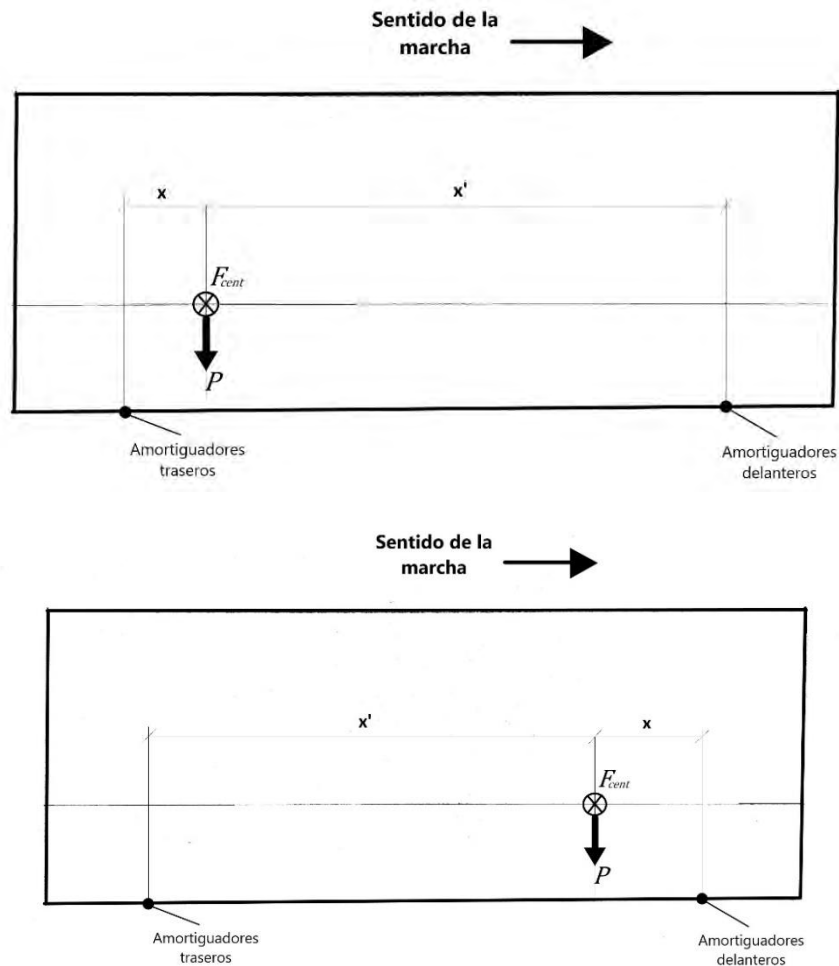


Figura 5.46: Fuerzas que actúan en curva sobre el CM a lo largo de la dirección X. Desplazamiento hacia la parte delantera (inferior) y hacia la parte trasera (superior). (Vista desde interior de la curva).

Como se observa en la imagen, la distancia x' es mayor que la distancia x , por tanto, cuando el centro de masas se encuentra en la parte delantera, los amortiguadores traseros sufrirán un momento mayor que los delanteros y experimentarán variaciones de longitud mayores. Cuando el centro de masas esta desplazado hacia la parte trasera ocurre lo contrario, y los amortiguadores delanteros son los que experimentan una mayor variación de longitud.

Sin embargo, al igual que en los casos anteriores, como en la curva de 5km de radio el valor del momento generado por peso es mayor que el creado por la fuerza centrífuga, los amortiguadores derechos son los que se comprimen mientras que los izquierdos se estiran.

Por otro lado, los valores máximos de compresión y alargamiento de los amortiguadores tienen lugar en la curva de 1 kilómetro de radio, ya que es la más cerrada de las tres. Estos valores máximos se registran cuando el centro de masas se ha desplazado lo máximo posible en ambos sentidos de la dirección X, es decir, en +10 y -10 metros. De esta forma, los amortiguadores han llegado a experimentar 1.72 cm a tracción y 1.71 cm a compresión.

A continuación, analizaremos los cambios que han experimentado los valores de las velocidades máximas según se ha ido modificando la posición del centro de masas a lo largo de la dirección X.

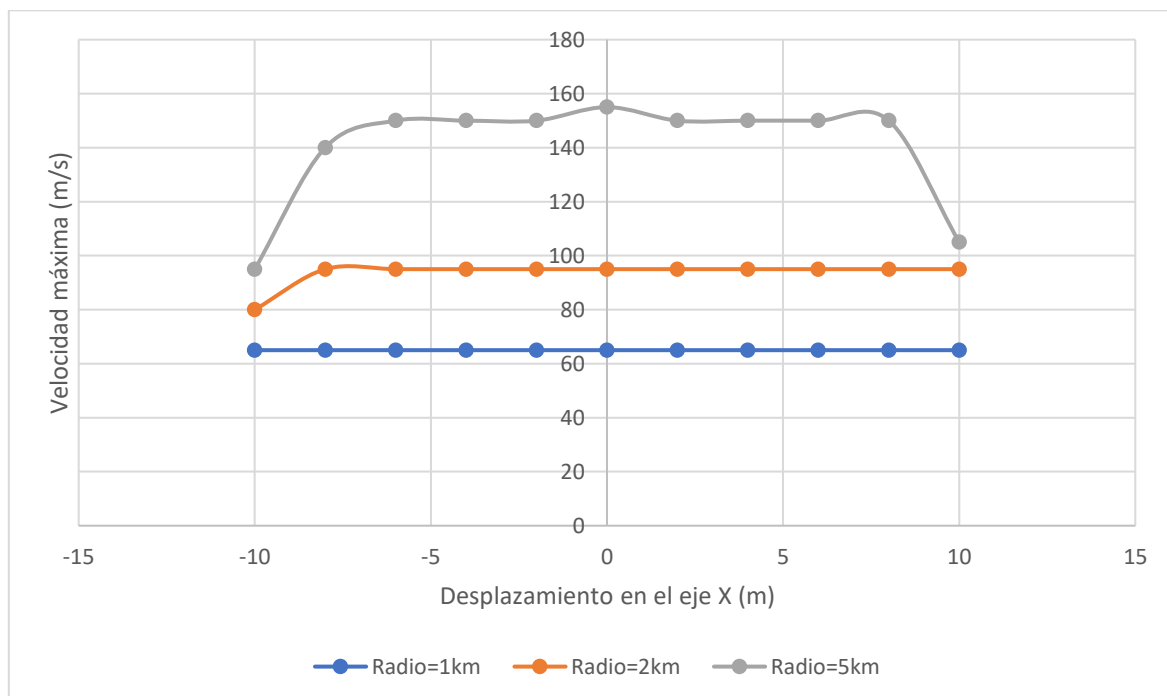


Figura 5.47: Comparación de las velocidades máximas (Dirección X).

Observando el gráfico, se observa que las velocidades máximas más altas ocurren cuando se circula por la curva de 5km como era de esperar, ya que es la curva con mayor radio y, por tanto, la más amplia.

En cuanto a los valores que obtenemos según variamos la posición del centro de masas, se observa que para la curva de 1km de radio la velocidad máxima se mantiene constante. En la curva de 2km ocurre lo mismo excepto por el valor obtenido cuando el centro de masas se ubica 10 metros por detrás de la posición inicial de éste.

Por último, para la curva de 5km de radio se observa que hay variaciones considerables. Cuando el centro se localiza en las posiciones más alejadas, se registran las velocidades máximas más bajas puesto que en esas posiciones la carga está repartida de forma muy desigual y, por tanto, el descarrilamiento se produce antes. Sin embargo, cuando el centro de masas se ubica en el centro del vehículo se registra la velocidad máxima más alta, ya que la carga está repartida de forma equitativa entre los cuatro amortiguadores. Para la curva de 5km de radio, el valor de la velocidad máxima puede variar desde los 95 m/s hasta los 155 m/s, una diferencia de 60 m/s, dependiendo de donde esté situado el centro de masas.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

Una vez realizadas las simulaciones y analizado los resultados obtenidos, se podría decir que hemos completado satisfactoriamente el objetivo principal del proyecto, centrado en el estudio analítico de los parámetros críticos de la suspensión secundaria de un vehículo ferroviario a su paso por curva. Además, los objetivos secundarios han sido una parte clave y han servido de guía para llevar a buen fin el objetivo principal.

También, se ha logrado elaborar una base teórica documental que es fundamental para la comprensión del contenido principal del proyecto. Estos conceptos teóricos, tratan los temas principales del sector ferroviario, la estructura de la vía, material rodante, la suspensión en los vehículos ferroviarios y una pequeña introducción a los amortiguadores viscoelásticos.

Para desarrollar la metodología de análisis propuesta y llevar a cabo los experimentos de simulación planificados, se utilizó el programa informático profesional Universal Mechanism. En el presente proyecto se han verificado las capacidades de este software de simulación y se ha mostrado su potencial para el análisis del comportamiento de vehículos ferroviarios.

Como se ha comentado, en el proyecto se ha particularizado un modelo de vehículo ferroviario y, para analizar el comportamiento dinámico de este vehículo, se han planteado diferentes experimentos de simulación donde se ha estudiado la evolución de la variación de longitud de los amortiguadores de la suspensión secundaria.

Las simulaciones se han llevado a cabo para un modelo de vehículo ferroviario de la librería de Universal Mechanism basado en el vehículo de pasajeros de “*Manchester benchmark*”. Un modelo que fue definido por investigadores de la universidad de Manchester con el objetivo de proporcionar un modelo que facilite el estudio del problema del diseño de la suspensión.

Con el problema a analizar perfectamente definido y la herramienta y el modelo establecidos, se procede a realizar el estudio. Para ello, se han planteado tres experimentos diferentes en los que se han incluido modificaciones en el modelo con el fin de analizar la evolución del comportamiento dinámico del parámetro a estudiar.

Los experimentos se han llevado a cabo en una vía con geometría curva. Se han elegido tres curvas de 90° de diferente amplitud, 1, 2 y 5 kilómetros de radio, por la que se le ha hecho circular a nuestro modelo a diferentes velocidades y esto ha permitido recopilar información sobre la influencia de la velocidad y el radio de la curva en nuestro parámetro.

- El primer experimento ha proporcionado resultados sobre el comportamiento de los amortiguadores en función de la velocidad. Además, se ha calculado la velocidad máxima de circulación del modelo por las diferentes curvas.
- El segundo experimento se ha centrado en analizar la influencia de los parámetros de la suspensión secundaria en el comportamiento de los amortiguadores. Para ello, se ha estudiado el efecto de variar las constantes de rigidez y amortiguación de los componentes de la suspensión secundaria, con el fin de obtener diferentes configuraciones de suspensión (más duras o más blandas). Las simulaciones se han realizado a una velocidad genérica establecida de valor 40 m/s. Además, se ha estudiado la evolución de la velocidad de máxima según el parámetro de rigidez de la suspensión.
- El tercer experimento ha consistido en modificar la posición del centro de masas de la caja del vehículo cuando circula a una velocidad genérica establecida, 40 m/s, y ver su influencia en la dinámica del vehículo. Para ello, el centro de masas se ha desplazado incrementalmente a lo largo de las tres direcciones posibles (vertical, axial y longitudinal), con el objetivo de estudiar la influencia de la posición del centro de masas en el comportamiento dinámico del vehículo a través de las variaciones en las elongaciones de los amortiguadores y en la velocidad máxima de circulación para cada curva.

Una vez terminadas las simulaciones, completados los experimentos y procesada la información obtenida, se han generado las tablas y gráficas de los resultados dados por Universal Mechanism, con los datos de interés para realizar el estudio. A continuación, se han clasificado, ordenado, interpretado y analizado estos datos generando nuevas tablas y gráficas, esta vez en MS-Excel, resultado del cruce y reordenación de las generadas en Universal Mechanism. Estas tablas y gráficas finales han permitido elaborar la comparación eficaz de los parámetros de interés, y de esta forma, obtener unas conclusiones categóricas.

La principal aportación de este trabajo es que se presenta una *metodología original*, tanto por su método de estudio, el campo de aplicación y la resolución del problema. También son aportaciones originales de este trabajo, los tres sucesos o partes principales de la estructura de esta metodología: Modelo de coche estándar Universal Mechanism particularizado; estudio de la dinámica de un vehículo ferroviario por la variación de la carrera de los amortiguadores de la suspensión secundaria; y los tres experimentos de simulación planteados que componen una imagen completa de la dinámica del vehículo.

A nivel técnico, se ha comprobado la viabilidad de estudiar la dinámica de un vehículo ferroviario por la variación de la carrera de los amortiguadores de la suspensión secundaria, con el programa Universal Mechanism. Las principales conclusiones obtenidas de los tres experimentos realizados se describen a continuación:

- De los resultados del primer experimento se puede afirmar que la variación de la longitud de los amortiguadores (tanto a compresión como a tracción) disminuye cuanto más amplia es la curva. Además, se ha demostrado que la velocidad máxima de circulación es mayor cuanto mayor es el radio de la curva.

Por otro lado, ha quedado demostrado que, para cada curva, existe un valor de velocidad crítica que provoca un cambio en la distribución de fuerzas del vehículo, produciéndose un cambio radical en el comportamiento de la suspensión. En cuanto a la variación de longitud de los amortiguadores, se ha comprobado que, para una velocidad constante, los valores más elevados se registran en las curvas más cerradas.

- Los resultados del segundo experimento verifican que, para valores elevados de las constantes rigidez y amortiguamiento del sistema de suspensión de un vehículo ferroviario, la velocidad máxima de circulación aumenta, mientras que la variación de la longitud experimentada por los amortiguadores disminuye. Sin embargo, una suspensión demasiado dura (valores altos de las constantes de rigidez y amortiguamiento) puede no ser capaz de filtrar adecuadamente las vibraciones que aparecen durante la curva y provocar el descarrilamiento del vehículo.
- Producto del tercer experimento se extrae que, en el caso de la ubicación vertical del centro de masas, la opción más favorable, desde el punto de vista dinámico, es situarlo lo más bajo posible, pues se verifica que el momento que actúa sobre los amortiguadores es menor y, por tanto, el riesgo de vuelco disminuye.

En el caso que el centro de masas se desplace en dirección axial, lo más recomendable en el paso por curva, es que esté situado lo más cerca posible al interior de la curva, reduciéndose así el riesgo de vuelco del vehículo.

Por último, si existe desplazamiento del centro de masas en dirección longitudinal, lo más conveniente es que estuviera situado en el centro del vehículo, se reduce el riesgo de descarrilamiento y se pueden alcanzar velocidades de circulación más altas. Además, el hecho que, en curva, el centro de masas esté desplazado hacia la parte delantera o trasera del vehículo cambia radicalmente la distribución de fuerzas del vehículo, con el consiguiente reflejo en la compresión o tracción en los amortiguadores.

Finalmente, para completar el estudio del comportamiento dinámico de la suspensión secundaria, decir que se han recopilado más de 800 gráficas de resultados directos de las simulaciones, lo que supone un total de más de 3200 valores y más de 50 tablas, para los amortiguadores que se han estudiado a distintas velocidades de circulación y para diferentes curvas. Toda esta información, junto con las curvas que se han definido y las modificaciones realizadas en el modelo, pueden servir como base para la realización de nuevos proyectos relacionados con el tema del diseño de la suspensión en un vehículo ferroviario.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

La realización del proyecto ha demostrado el gran potencial de la herramienta de simulación utilizada, Universal Mechanism, cuando se trata de la simulación de vehículos ferroviarios. Por tanto, con la intención de profundizar en el problema del diseño de la suspensión en un vehículo ferroviario por medio de esta herramienta, sería interesante realizar alguno de los siguientes trabajos partiendo del presente proyecto como base.

- Realizar experimentos con modelos de vehículos ferroviarios de mercancías. En la librería de Universal Mechanism está incluido también el modelo de vehículo de transporte de mercancías de *“Manchester benchmark”*.
- Realizar el análisis de la suspensión con un modelo basado en un vehículo ferroviario real. El propio programa de simulación permite importar y crear tus propios modelos de vehículo ferroviario.
- Estudiar el comportamiento dinámico de la suspensión secundaria desplazando el centro de gravedad en más de una dirección a la vez y ver la influencia que tendría en el valor de la velocidad máxima.
- Analizar otro componente de la suspensión secundaria diferente del que hemos estudiado en este proyecto.
- Realizar el análisis de los experimentos 2 y 3 para velocidades diferentes a la velocidad genérica establecida, con el fin de estudiar la evolución del comportamiento según la velocidad de circulación.
- Estudiar la influencia del valor del peralte en el comportamiento de la suspensión de un vehículo ferroviario a su paso por curva.
- Estudiar el problema de contacto rueda-raíl de un vehículo ferroviario.

7 PRESUPUESTO

A continuación, se presentan los costes y recursos que ha supuesto este proyecto, tanto los costes materiales, como los personales que hemos necesitado durante los cuatro meses que ha llevado realizar el proyecto. Desde un punto de vista general, podemos dividir todos estos gastos en tres bloques: el equipo informático, el tiempo dedicado por el personal y otros gastos.

7.1.1.1 EQUIPO INFORMÁTICO

Dentro del equipo informático, se encuentra el coste de un ordenador portátil con la suficiente potencia para realizar las simulaciones del software, “Universal Mechanism”, con fluidez y sin ningún tipo de problema. El precio de este componente lo estimamos en unos 1100 €. Consideramos una vida estimada de 4 años (48 meses) para el ordenador y un uso de 6 meses para la realización del proyecto.

Además, en este apartado incluimos las licencias informáticas de los softwares empleados en este proyecto. La licencia del paquete de Microsoft Office Professional 2016 tiene un coste aproximados de 150 €. De este paquete, las herramientas más utilizadas han sido Microsoft Word, para la redacción del proyecto y Microsoft Excel, para la obtención de las tablas y gráficos. Por otro lado, la licencia de “Universal Mechanism”, necesaria para la realización de todas las simulaciones y obtención de datos del proyecto, supone un coste de 9020 €, incluyendo todos los módulos y herramientas del programa necesarias para la realización del proyecto (UM Loco, UM Subsystem, UM Train, UM Train 3D). Por último, nombrar el uso de un editor de imágenes que ha sido empleado también, pero no se va a considerar como coste al ser un software libre. Para ambas las licencias, hemos estimado una amortización de la cuarta parte de su coste.

7.1.1.2 GASTOS DE PERSONAL

Para los gastos de personal, hemos considerado únicamente el tiempo empleado por el alumno que ha realizado el proyecto

Por un lado, el alumno, el cual ha invertido un total de 230 horas en el proyecto. Se ha estimado unas 40 horas para la investigación y búsqueda de información, 120 horas de trabajo con “Universal Mechanism”, que incluyen las modificaciones de los parámetros en el modelo de vehículo para cada experimento y la simulación de éstos, 20 horas destinadas al procesado e interpretación de los resultados. Y, por último, 50 horas para la implementación de resultados, conclusiones y redacción de la memoria del proyecto.

Gastos de personal				
Empleado	Tarea	Precio por hora (€/h)	Tiempo empleado (h)	Coste (€)
Alumno	Investigación y documentación	20	40	800
	Simulación con UM	30	120	3600
	Procesado e interpretación de resultados	50	20	1000
	Conclusiones y redacción de la memoria	30	50	1500
Coste total (€)				6900

Tabla 7.1: Resumen de los gastos de personal.

7.1.1.3 GASTOS INDIRECTOS

En este apartado, incluimos los gastos de material de oficina, desplazamientos realizados durante el periodo de realización del proyecto, dietas... Todo esto supone un gasto aproximado del 10% del coste bruto del proyecto.

A continuación, se muestra una tabla con el desglose de los costes del proyecto, en la que se muestran los detalles del presupuesto final.

Desglose de los costes del proyecto			
Equipo informático			
Descripción		Inversión inicial (€)	Coste (€)*
Ordenador portátil		1100	137.5
Licencias	Paquete Microsoft Office	150	37.5
	Universal Mechanism	9020	2255
	Editor imágenes	0	0
Coste total			2430
Gastos de personal			
Descripción		Coste (€)	
Alumno	Investigación y documentación	800	
	Simulación con UM	3600	
	Procesado e interpretación de resultados	1000	
	Conclusiones y redacción de la memoria	1500	
Coste total			6900
Coste bruto			9330
Coste indirecto (10%)			933
Coste total (Bruto + indirecto)			10263
Impuestos (21%)			2155.23
COSTE TOTAL DEL PROYECTO			12418.23

Tabla 7.2: Desglose de los costes del proyecto.

***NOTA: Valor obtenido aplicando la amortización establecida.**

Todos estos gastos suponen el coste bruto, que suma un gasto de 9330 €, a lo que se le ha añadido un 10% como gasto indirecto, lo que hace un total de 10263 €.

Por último, falta añadir un 21% al este coste como concepto de impuestos. Por lo que el coste final de todo el proyecto sería de **12418.23 €**.

Por último, se muestra un gráfico a modo de resumen de los gastos de cada bloque.

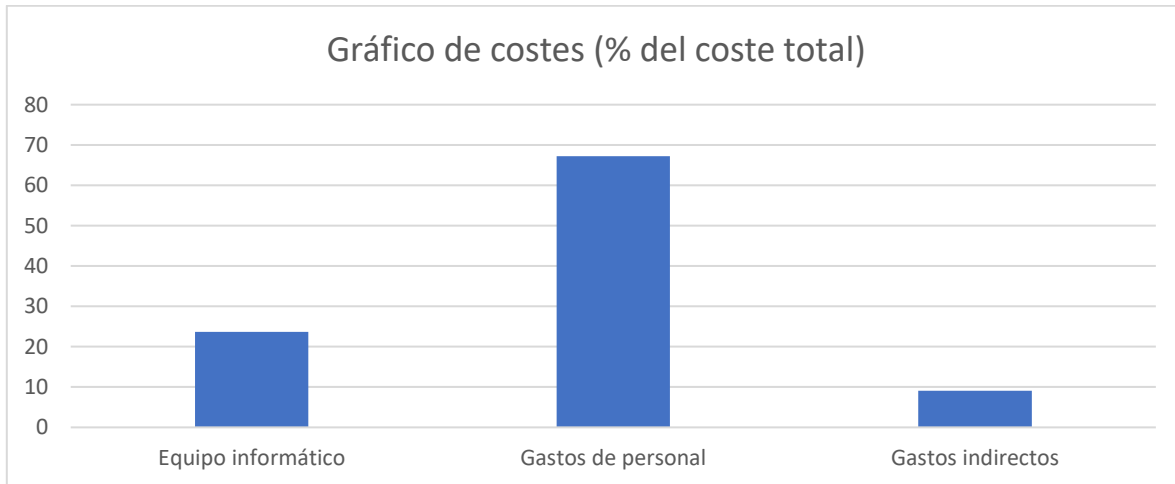


Tabla 7.3: Gráfico de costes.

Como podemos observar, los gastos de personal es el elemento con mayor coste, y representan un 67.22% del coste bruto, ya que el proyecto requiere una enorme cantidad de tiempo dedicada a la simulación y procesado e interpretación de los resultados. Seguidamente, se encuentran los gastos del equipo informático, que constituyen un 23.68%, ya que las licencias de los programas utilizados para la simulación y procesado de datos suponen un desembolso importante. Por último, se encuentran los gastos indirectos, que no suponen un gasto muy importante, y suponen un 9.1% del desembolso total.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Europapress,» Ep Turismo, [En línea]. Available:
<http://www.europapress.es/turismo/transportes/tren/noticia-espana-lider-mundial-ferrocarriles-ultima-generacion-50-proyectos-exterior-20171031141622.html>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [2] «Historia de Iberia Vieja,» Made In Spain, [En línea]. Available:
<http://www.historiadeiberiavieja.com/secciones/made-in-spain/primer-ferrocarril-espana>.
[Último acceso: Mayo 2018].
- [3] D. Á. Mántaras y P. L. Rodríguez, Ferrocarriles, 2003.
- [4] «Wikipedia,» [En línea]. Available:
https://es.wikipedia.org/wiki/Liberalizaci%C3%B3n_del_transporte_ferroviario_en_Espa%C3%B1a.
a. [Último acceso: Mayo 2018].
- [5] «Sertrans,» [En línea]. Available: <http://www.sertrans.es/trasporte-terrestre/ventajas-desventajas-transporte-ferroviario-mercancias/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [6] P. P. d. Campo, «Cofis,» [En línea]. Available: https://www.cofis.es/pdf/fys/fys13/fys13_26-27.pdf.
- [7] «Ecologistas en acción,» [En línea]. Available: <https://www.ecologistasenaccion.org/?p=29806>.
[Último acceso: Mayo 2018].
- [8] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Tren_de_alta_velocidad. [Último acceso: Mayo 2018].
- [9] «European Transport Safety Council,» [En línea]. Available: https://etsc.eu/wp-content/uploads/2003_transport_safety_stats_eu_overview.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [10] M. M. Maynar y F. J. G. Fernández, Ferrocarriles metropolitanos, 2002.
- [11] «Adif,» [En línea]. Available:
http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/oferta_de_empleo_publico/doc/08_fc_ConceptosFerroviarios.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [12] E. C. Ruiz, *La utilización de vía en placa en líneas de alta velocidad: Aplicación práctica*, 2013.

- [13] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADa_en_placa. [Último acceso: Mayo 2018].
- [14] M. L. Azcué, *Trabajo de Fin de Master: Estudio y simulación del contacto rueda-raíl en un sistema multicuerpo ferroviario*, Universidad Carlos III de Madrid, 2017.
- [15] «Renfe,» [En línea]. Available: www.renfe.com/empresa/empleo_y_formacion/Op.../Manual_Op_Fab.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [16] «Club Ferroviari Vaporista de Mallorca,» [En línea]. Available: <http://www.cfvn.es/vercategoria.php?id=640>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [17] F. J. Miranda, *Trabajo de Fin de Grado: Estudio y análisis mecánico*, Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [18] J. F. Torrecillas, P. P. Lacalle, J. F. Santamaría y F. T. M. d. Bedoya, *Trabajo Oficina Técnica: Sistema de frenado electromagnético para ascensores*, Universidad Carlos III de Madrid, 2017.
- [19] J. J. Zurro, *Trabajo de Fin de Grado: Estudio del comportamiento dinámico de un vehículo*, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [20] V. Fombuena, T. Boronat y L. Sánchez-Nácher, «Utilidad de los modelos de viscoelasticidad».
- [21] «Universal Mechanism,» [En línea]. Available: <http://www.universalmechanism.com/en/pages/index.php?id=7>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [22] «Universal Mechnism,» [En línea]. Available: http://www.universalmechanism.com/download/80/eng/00_um_introduction.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [23] «Universal Mechanism,» [En línea]. Available: http://www.universalmechanism.com/download/80/eng/01_um_configuration.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [24] «Aenor,» [En línea]. Available: www.aenor.es/DescargasWeb/normas/normalizacion_UNE.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [25] «Aenor,» [En línea]. Available: <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0039538&PDF=Si#.WxgJNCC-IPZ>. [Último acceso: Mayo 2018].

- [26] «Aenor,» [En línea]. Available:
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0041076&PDF=Si#.WxgJWiC-IPZ>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [27] «Aenor,» [En línea]. Available:
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0052894&PDF=Si#.WxRq4CC-IPY>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [28] «Aenor,» [En línea]. Available:
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0031389&PDF=Si#.WxRrCCC-IPY>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [29] «Aenor,» [En línea]. Available:
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0031394&PDF=Si#.WxRrCiC-IPY>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [30] «Aenor,» [En línea]. Available:
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0031396&PDF=Si#.WxRrDiC-IPY>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [31] «Aenor,» [En línea]. Available:
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0033082&PDF=Si#.WxRrESC-IPY>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [32] «Aenor,» [En línea]. Available:
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0002619&PDF=Si#.WxRrYiC-IPY>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [33] «Aenor,» [En línea]. Available:
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0002620&PDF=Si#.WxRrZCC-IPY>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [34] «Aenor,» [En línea]. Available:
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0045231&PDF=Si#.WxRqPiC-IPY>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [35] «Universidad Politecnica de Valencia,» [En línea]. Available:
www.upv.es/contenidos/CATRENFE/info/824153C.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].

- [36] «Seguridad Ferroviaria,» [En línea]. Available:
<http://www.seguridadferroviaria.es/normativa/normativa-europea/normativa-en-materia-de-interoperabilidad>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [37] «Seguridad Ferroviaria,» [En línea]. Available:
<http://www.seguridadferroviaria.es/normativa/normativa-nacional/normativa-en-materia-de-interoperabilidad>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [38] «Universal Mechanism,» [En línea]. Available:
http://www.universalmechanism.com/download/80/eng/g_s_um_loco.pdf. [Último acceso: Junio 2018].
- [39] [En línea]. Available: <http://f03.s.alicdn.com/kf/HTB1gjuwFVXXXXcoXpXX.PRXFXXj.pdf>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [40] D. S. Iwnicky, Manchester Benchmarks for Rail Vehicle, 1998.
- [41] «Universal Mechanism,» [En línea]. Available:
http://www.universalmechanism.com/download/80/eng/10_um_loco_manchester_benchmarks.pdf. [Último acceso: Junio 2018].

ANEXOS

Índice de contenido

A.	EXPERIMENTO 1	1
A.1	RADIO 1KM.....	1
A.2	RADIO 2KM.....	6
A.3	RADIO 5KM.....	13
B.	EXPERIMENTO 2	24
B.1	RADIO 1KM.....	24
B.2	RADIO 2KM.....	74
B.3	RADIO 5KM.....	143
C.	EXPERIMENTO 3	252
C.1	EJE Z.....	252
C.2	EJE Y.....	261
C.3	EJE X.....	267

A. EXPERIMENTO 1

A.1 RADIO 1KM

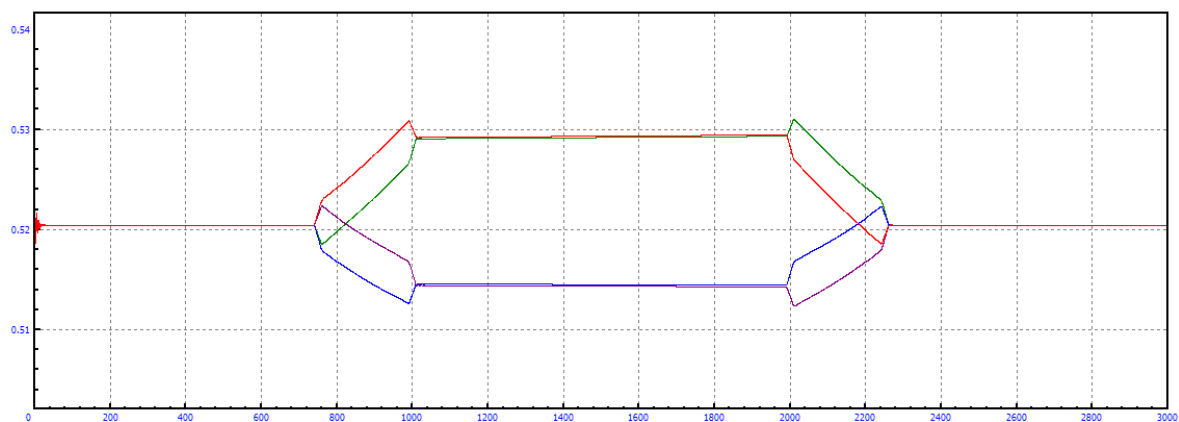


Figura A.1: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=5\text{m/s}$

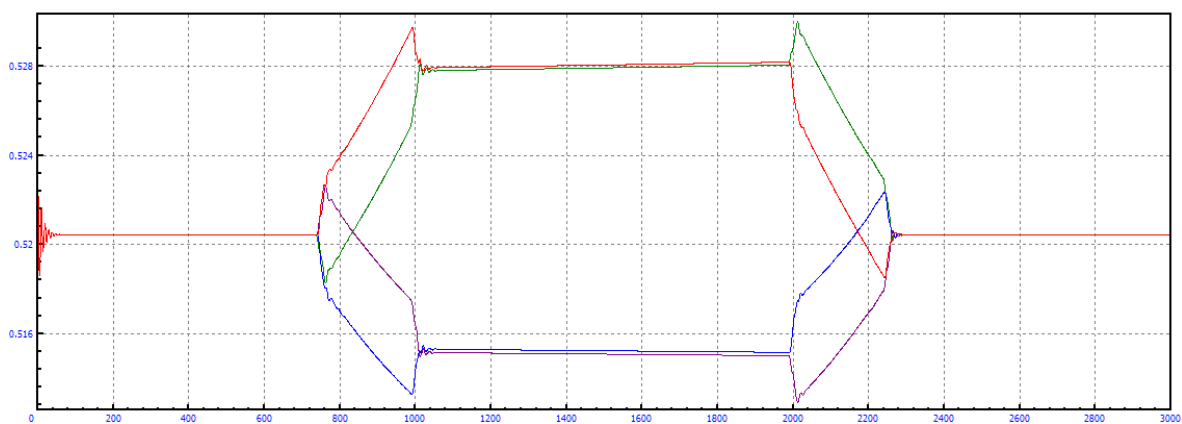


Figura A.2: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=10\text{m/s}$

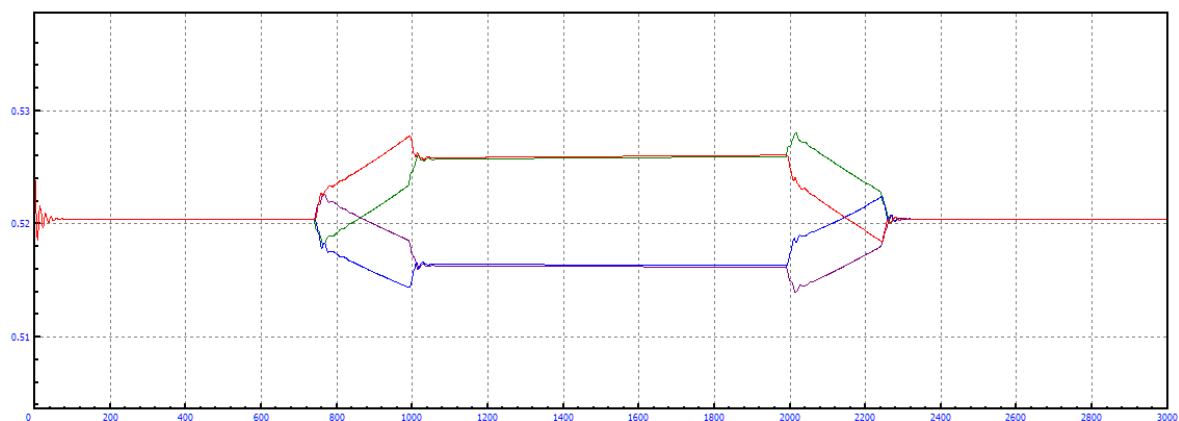


Figura A.3: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=15\text{m/s}$

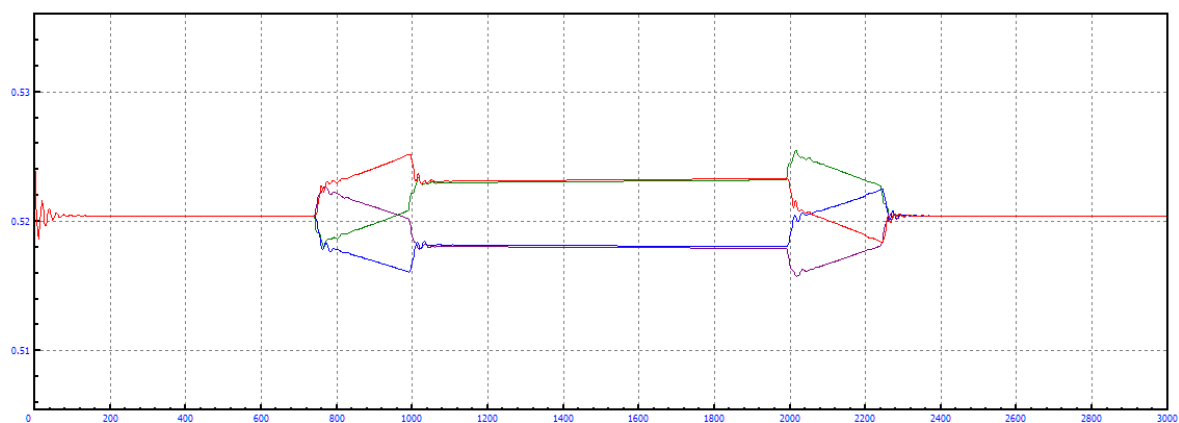


Figura A.4: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=20\text{m/s}$

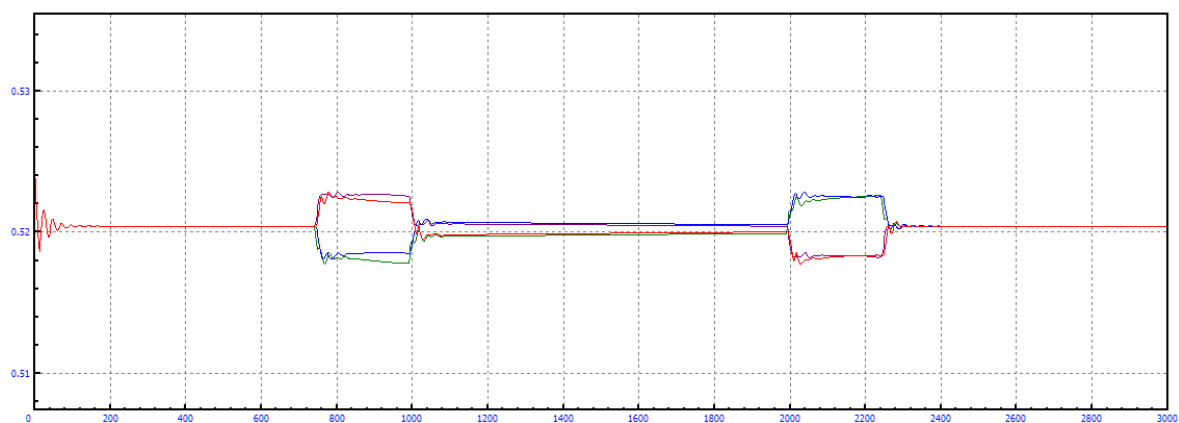


Figura A.5: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=25\text{m/s}$

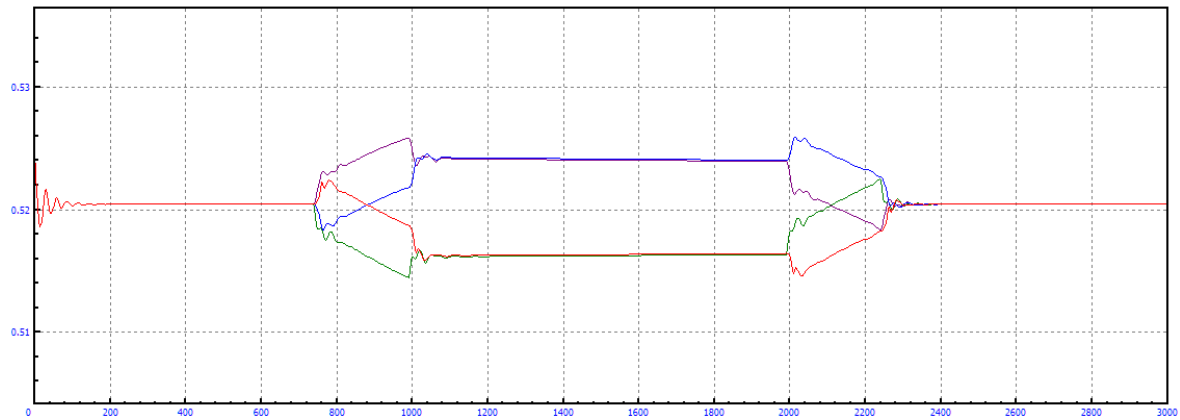


Figura A.6: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=30\text{m/s}$

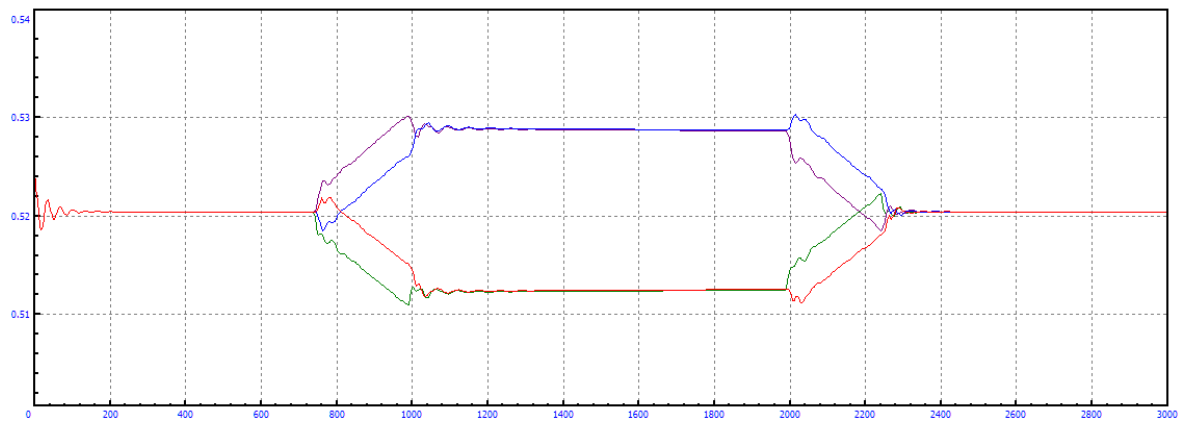


Figura A.7: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=35\text{m/s}$

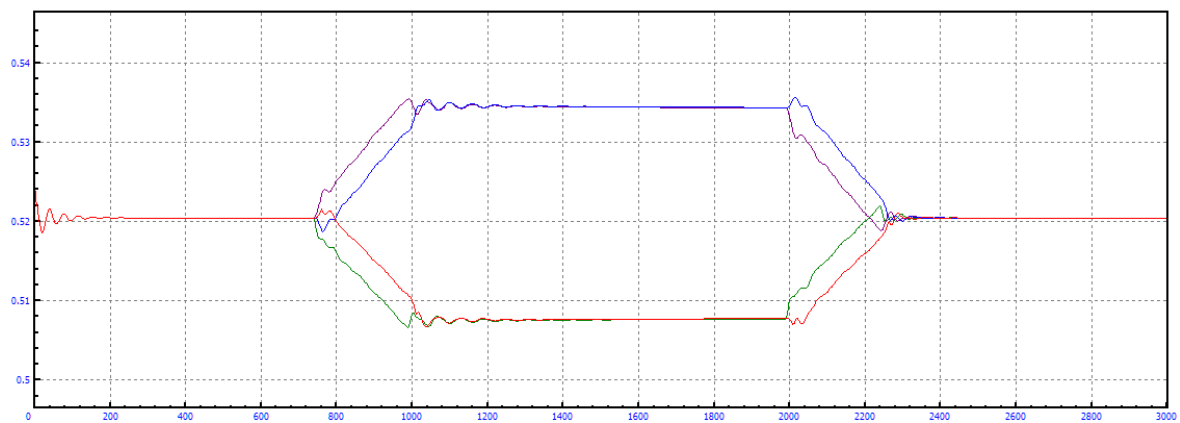


Figura A.8: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=40\text{m/s}$

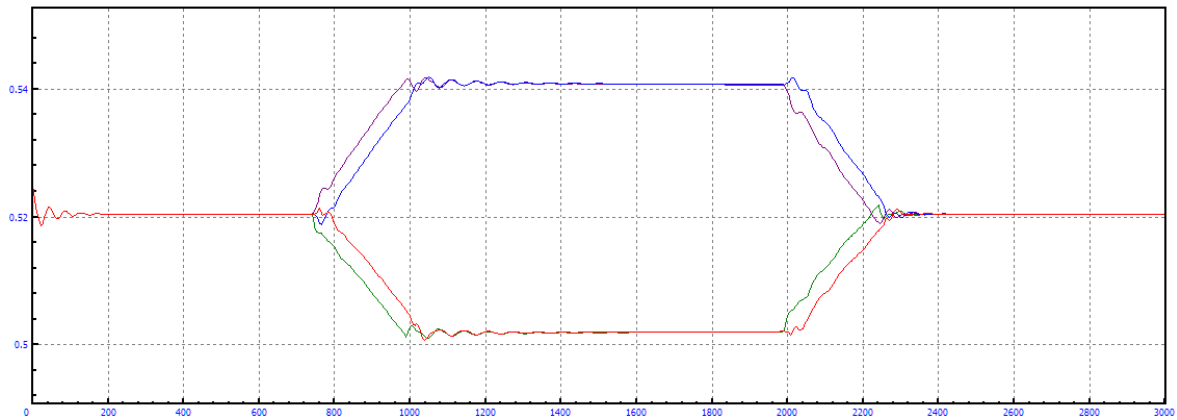


Figura A.9: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=45\text{m/s}$

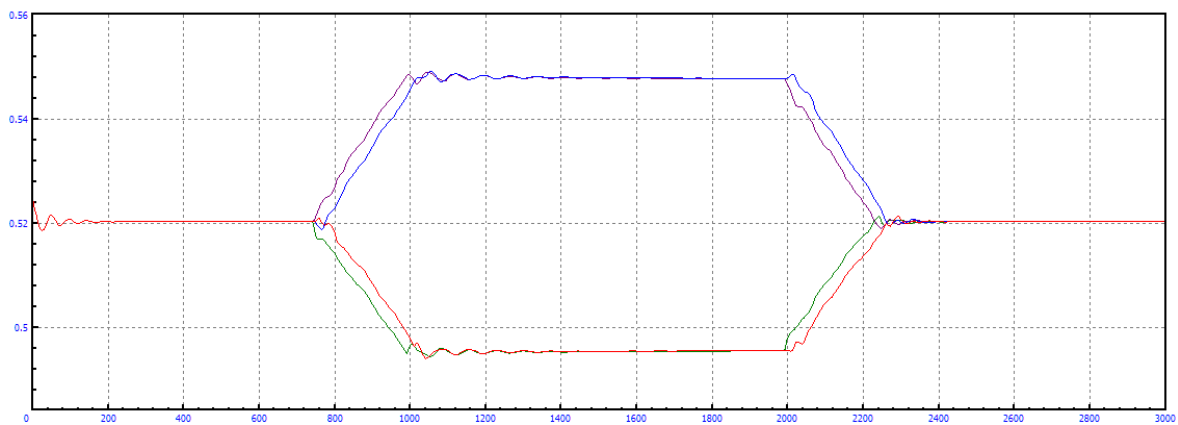


Figura A.10: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=50\text{m/s}$

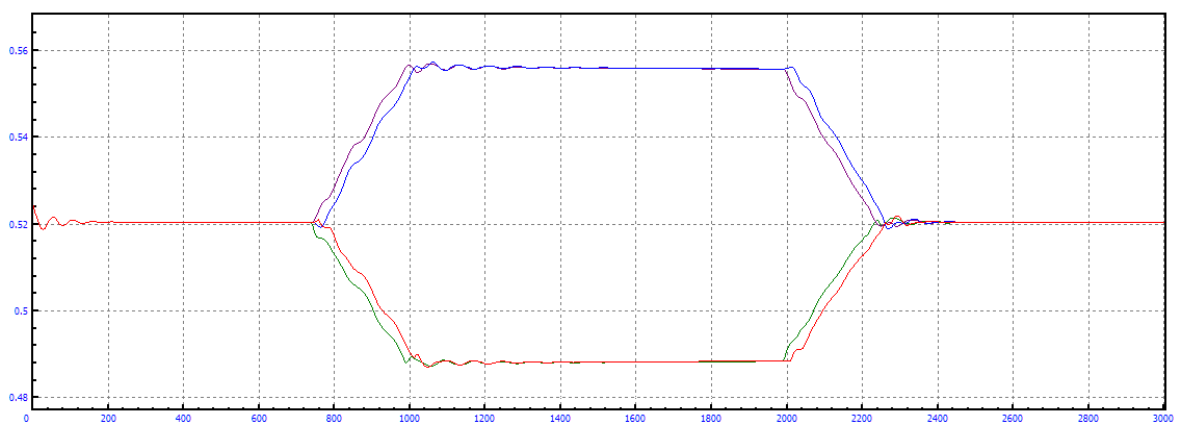


Figura A.11: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=55\text{m/s}$

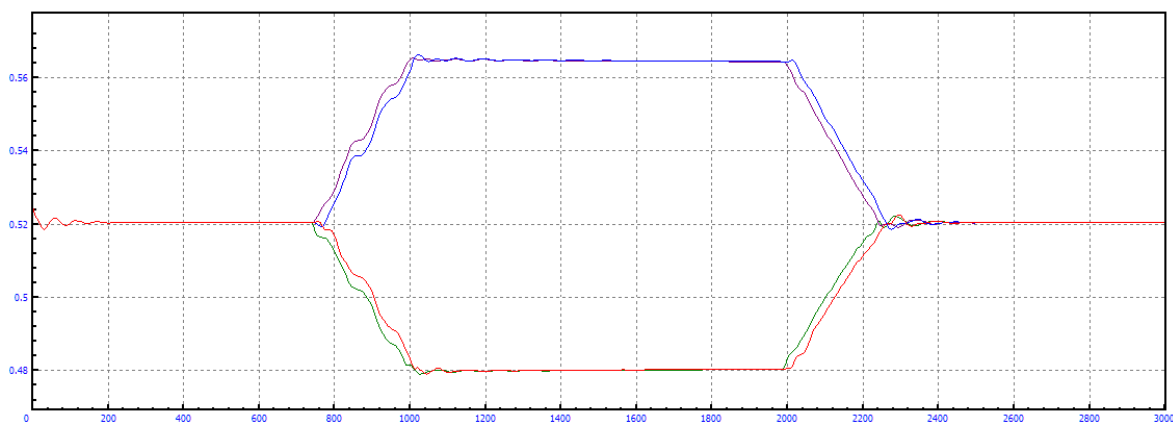


Figura A.12: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=60\text{m/s}$

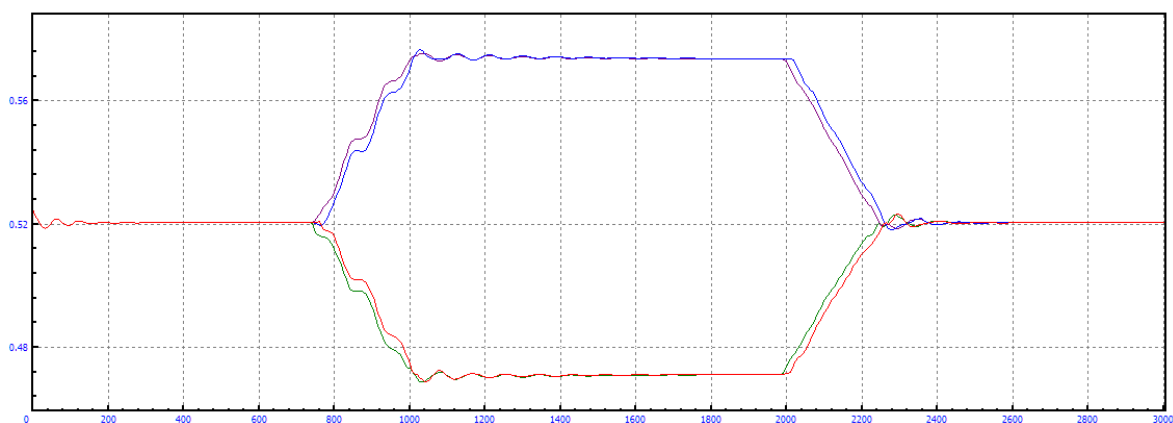


Figura A.13: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=65\text{m/s}$

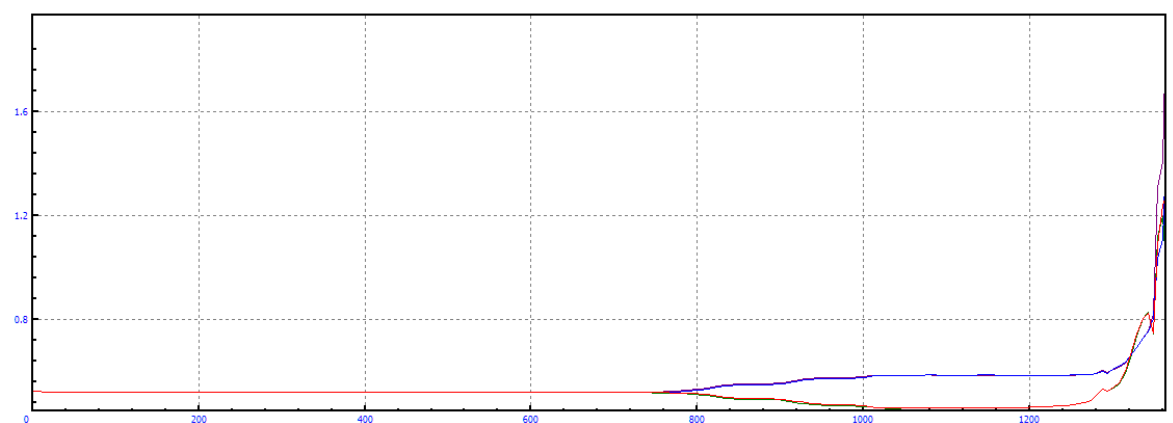


Figura A.14: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$ y $V=70\text{m/s}$

A.2 RADIO 2KM

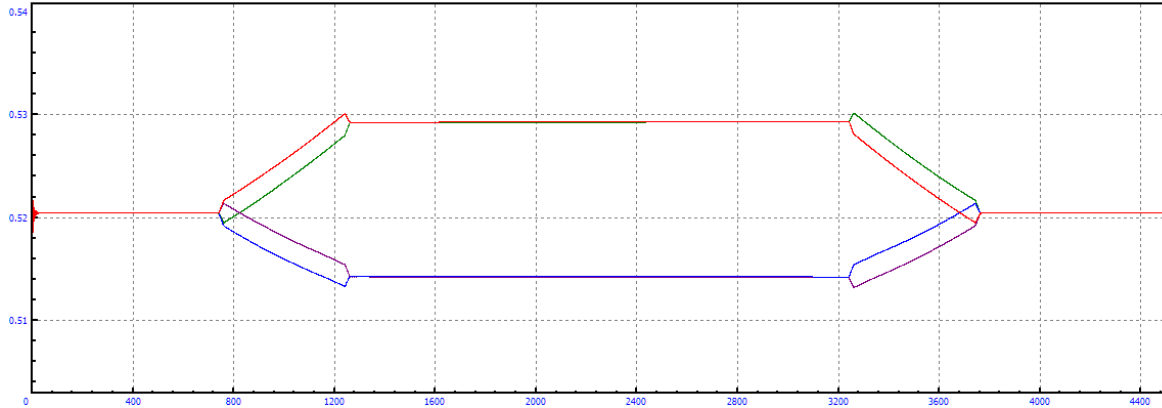


Figura A.15: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=5\text{m/s}$

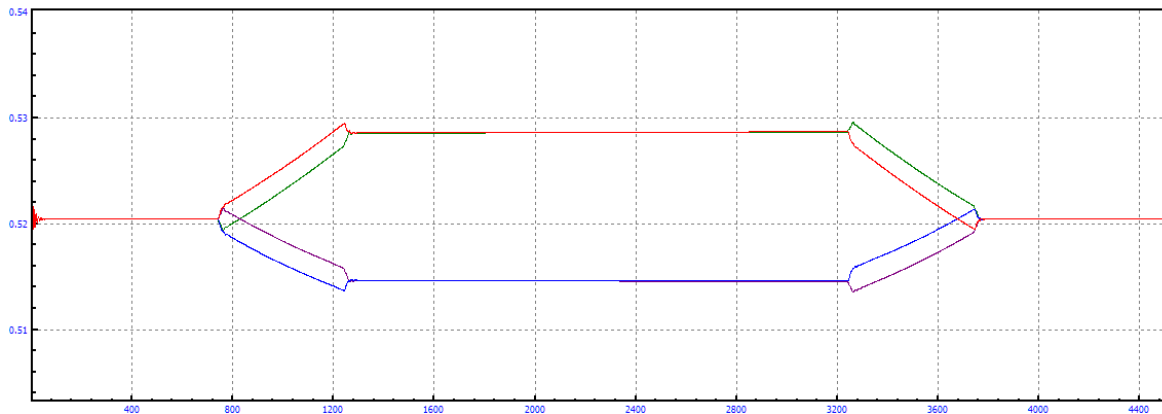


Figura A.16: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=10\text{m/s}$

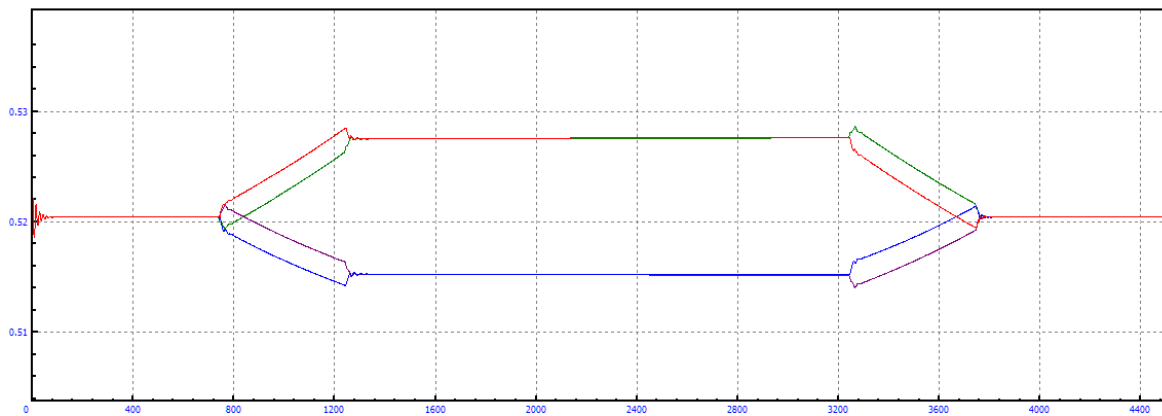


Figura A.17: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=15\text{m/s}$

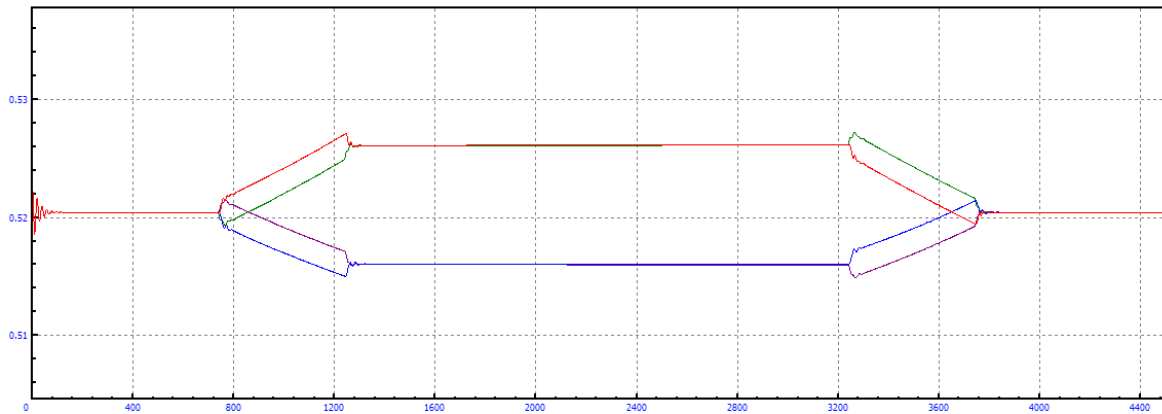


Figura A.18: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{ km}$ y $V=20\text{ m/s}$

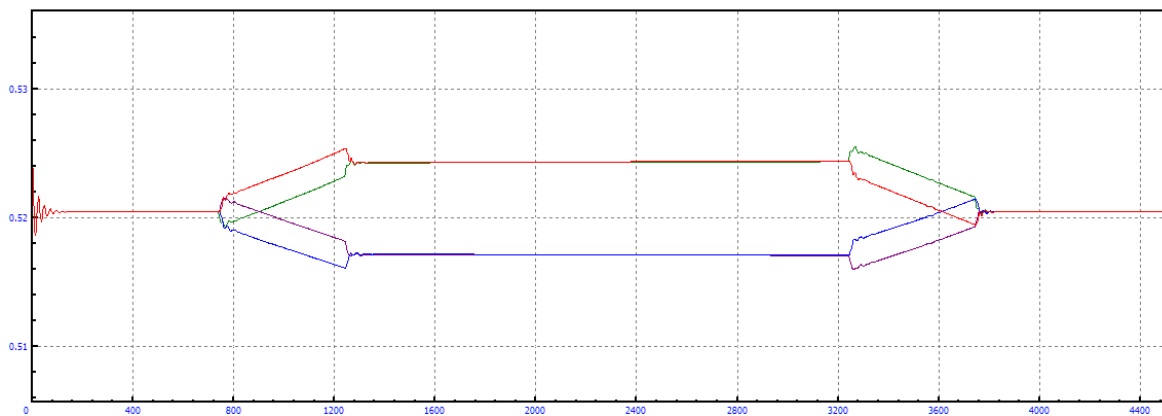


Figura A.19: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{ km}$ y $V=25\text{ m/s}$

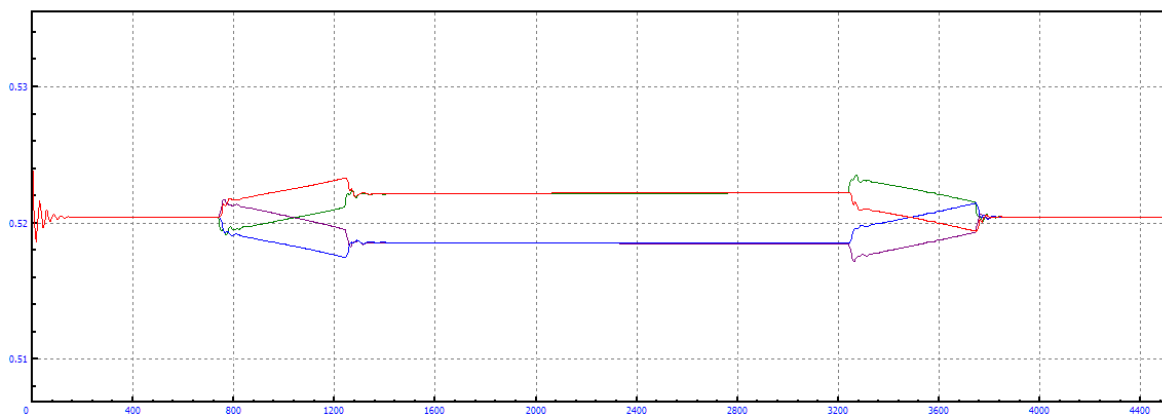


Figura A.20: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{ km}$ y $V=30\text{ m/s}$

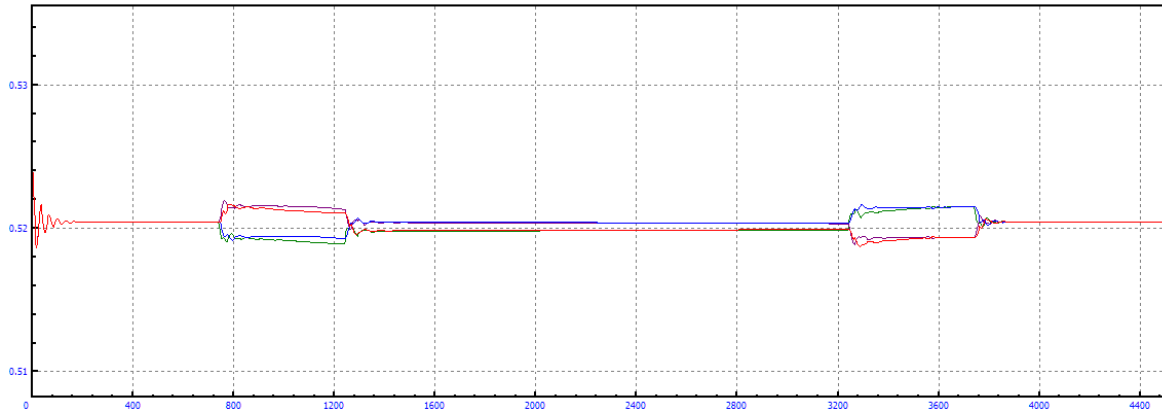


Figura A.21: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=35\text{m/s}$

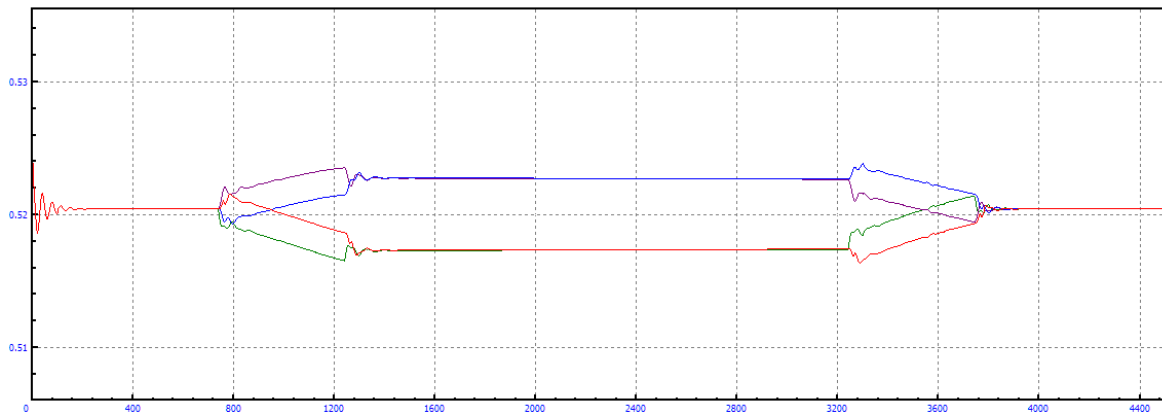


Figura A.22: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=40\text{m/s}$

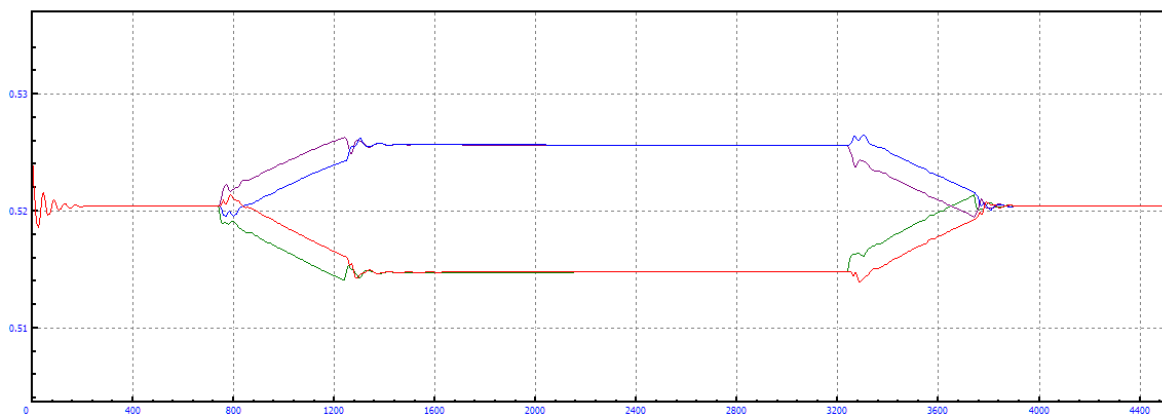


Figura A.23: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=45\text{m/s}$

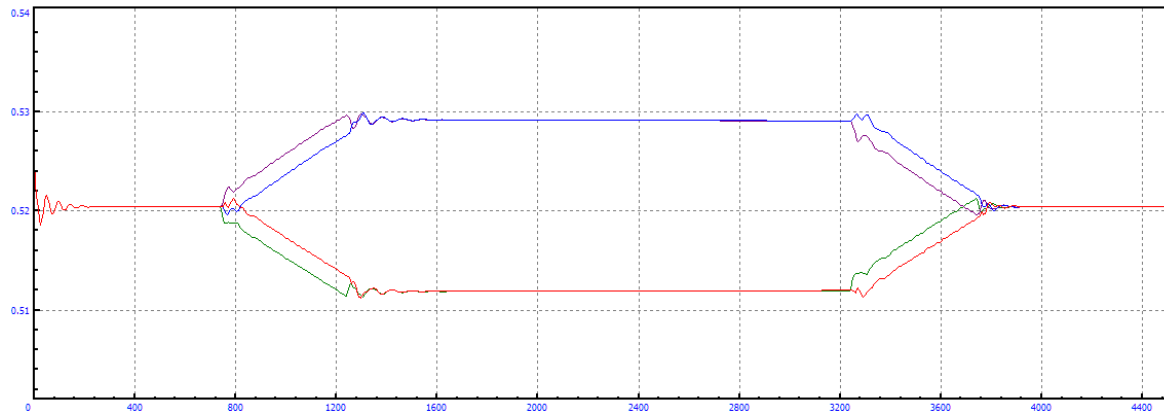


Figura A.24: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=50\text{m/s}$

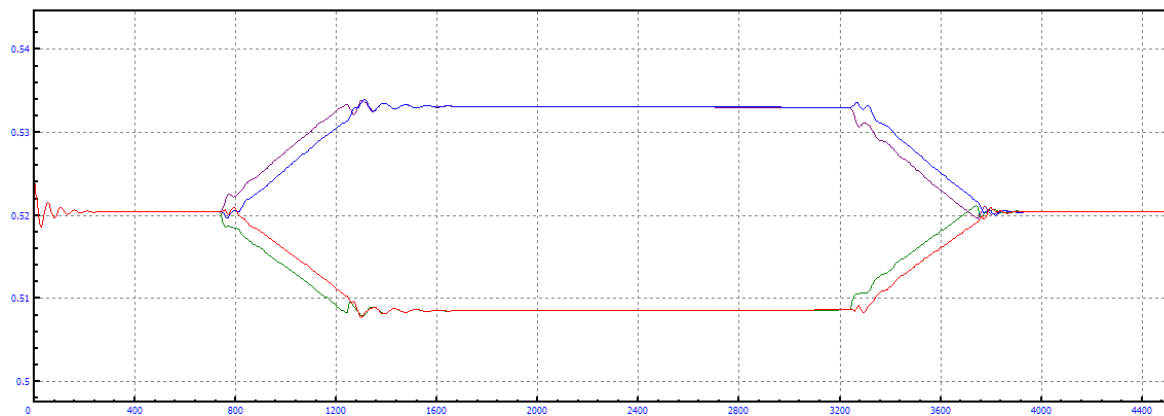


Figura A.25: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=55\text{m/s}$

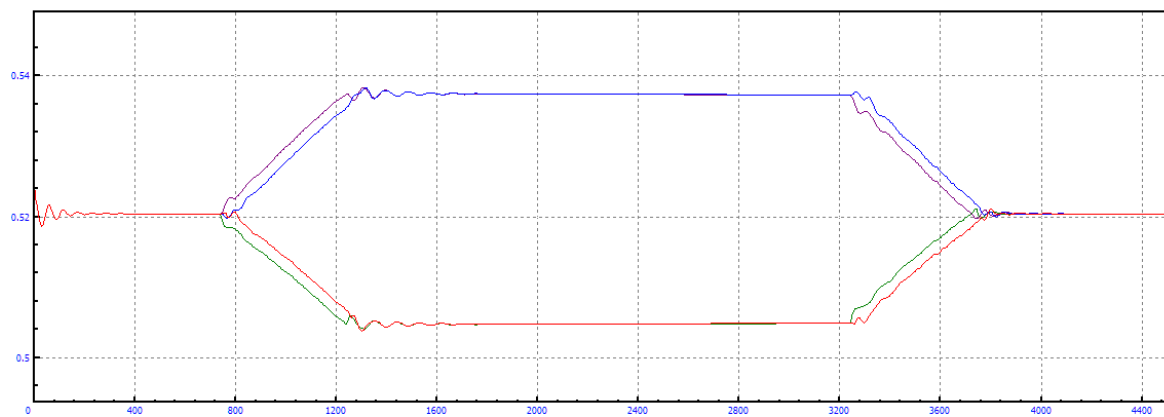


Figura A.26: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=60\text{m/s}$

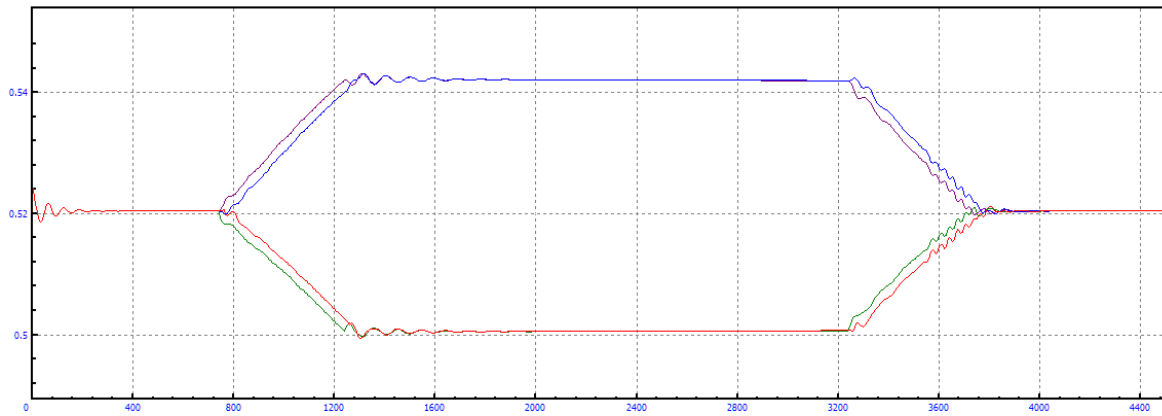


Figura A.27: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{ km}$ y $V=65\text{ m/s}$

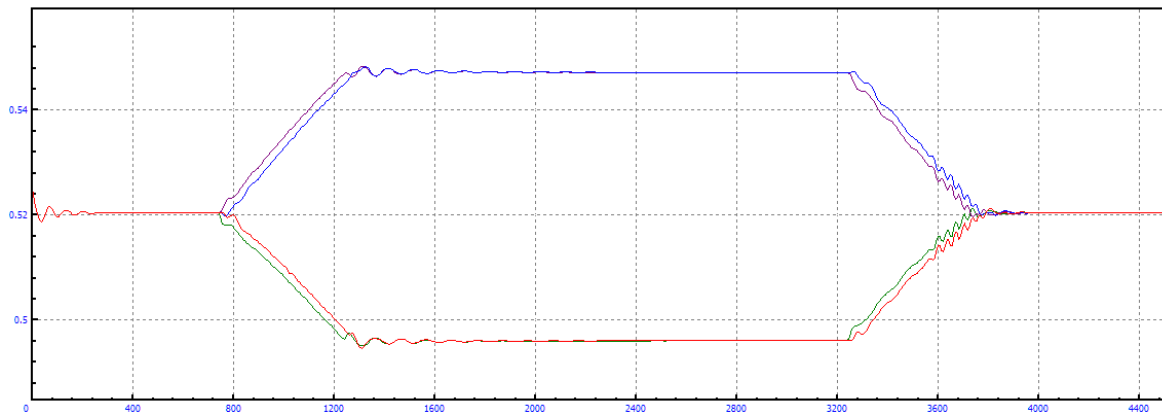


Figura A.28: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{ km}$ y $V=70\text{ m/s}$

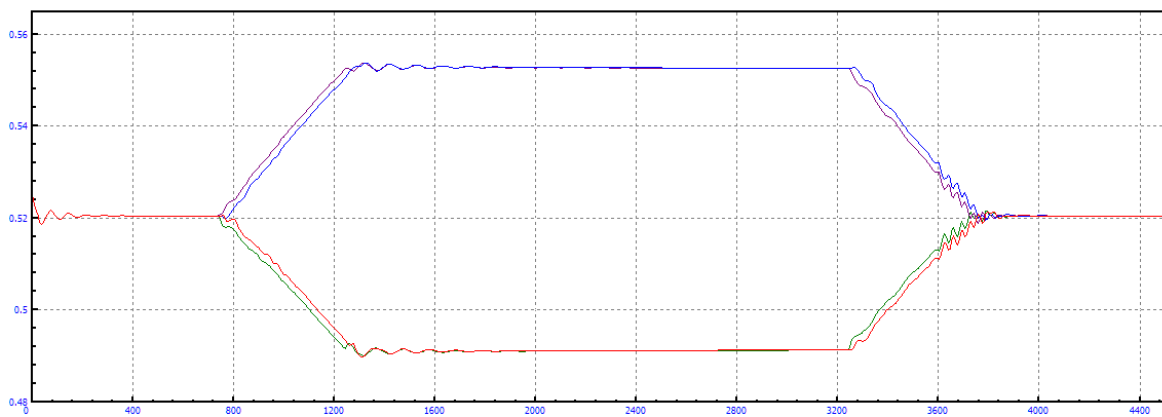


Figura A.29: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{ km}$ y $V=75\text{ m/s}$

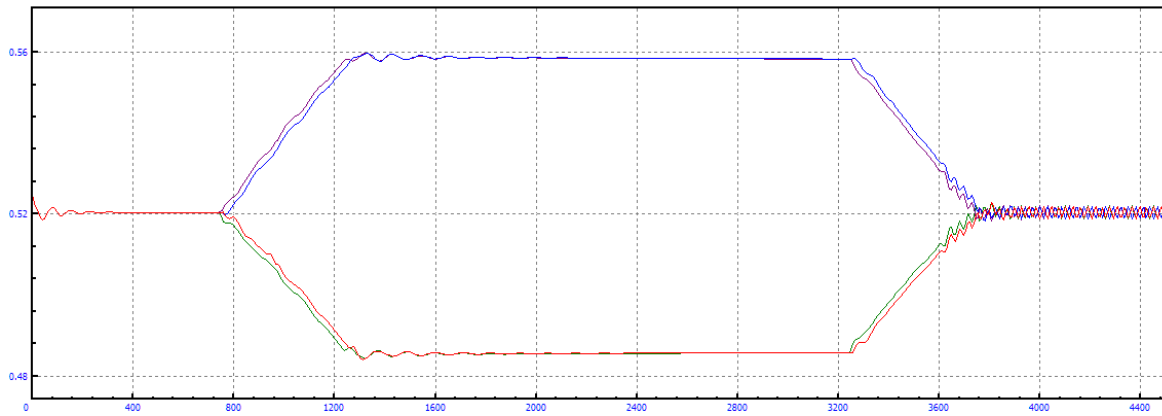


Figura A.30: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=80\text{m/s}$

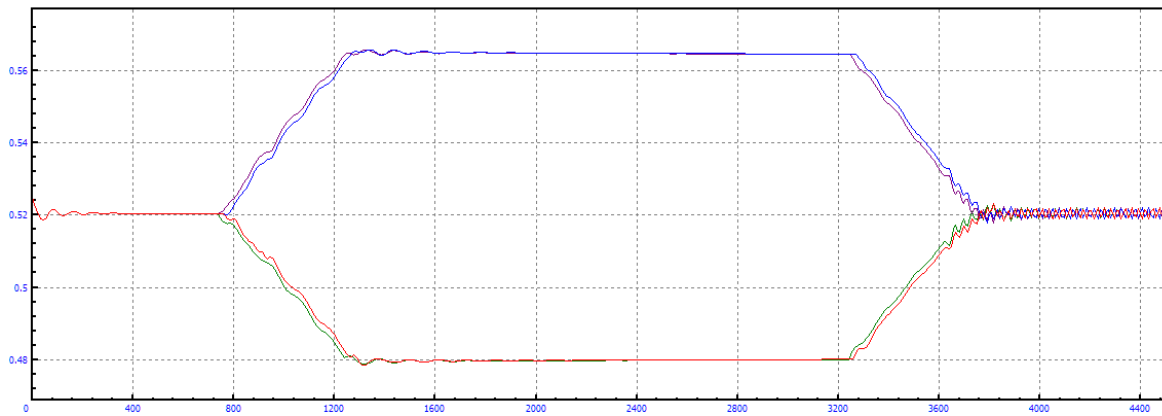


Figura A.31: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=85\text{m/s}$

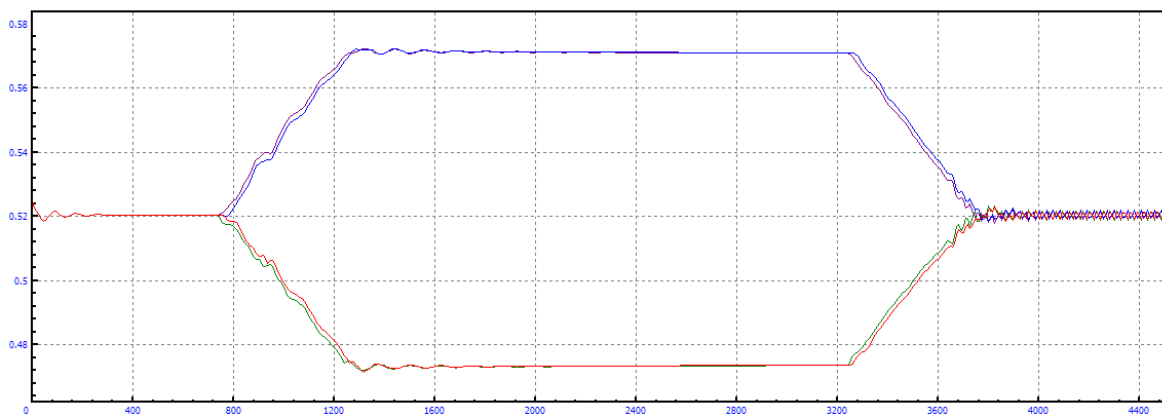


Figura A.32: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=90\text{m/s}$

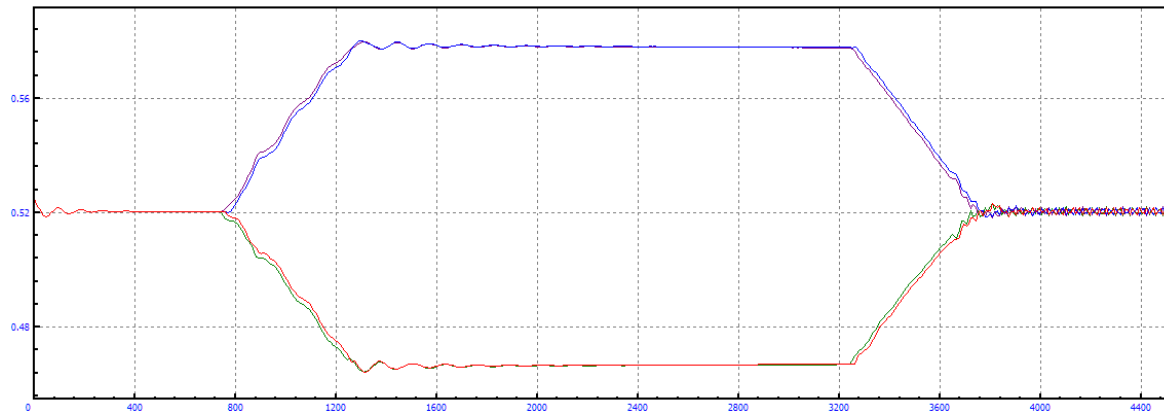


Figura A.33: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=95\text{m/s}$

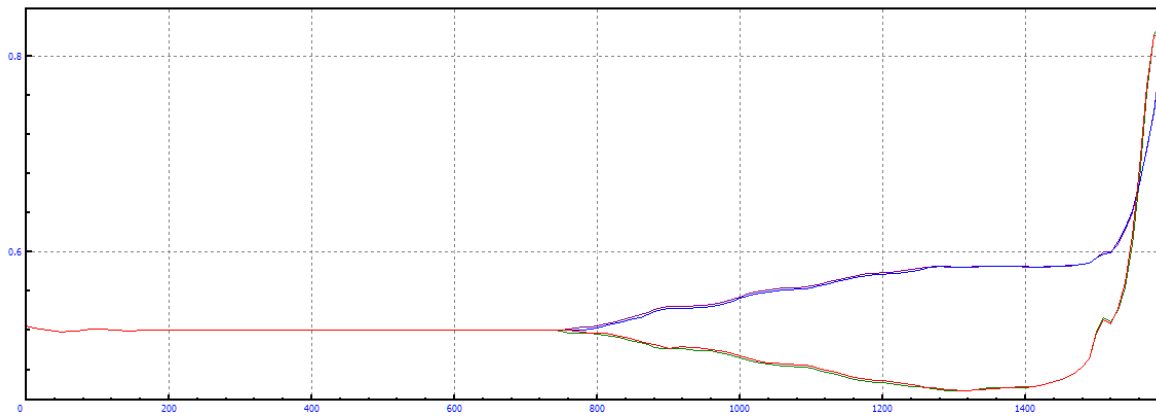


Figura A.34: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$ y $V=100\text{m/s}$

A.3 RADIO 5KM

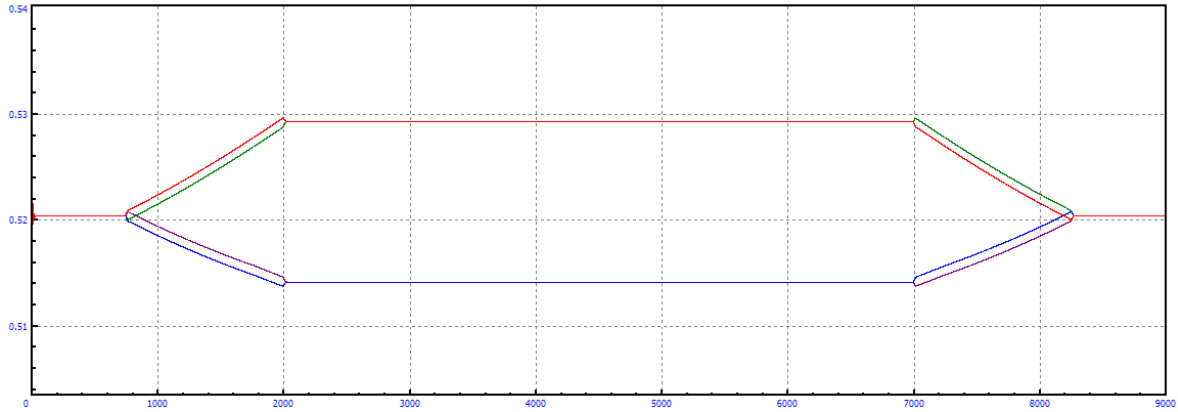


Figura A.35: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=5\text{m/s}$

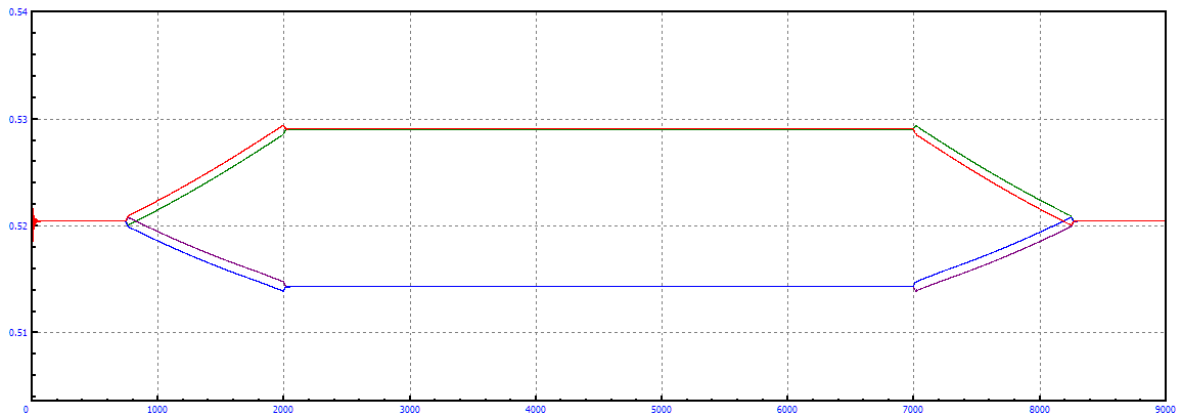


Figura A.36: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=10\text{m/s}$

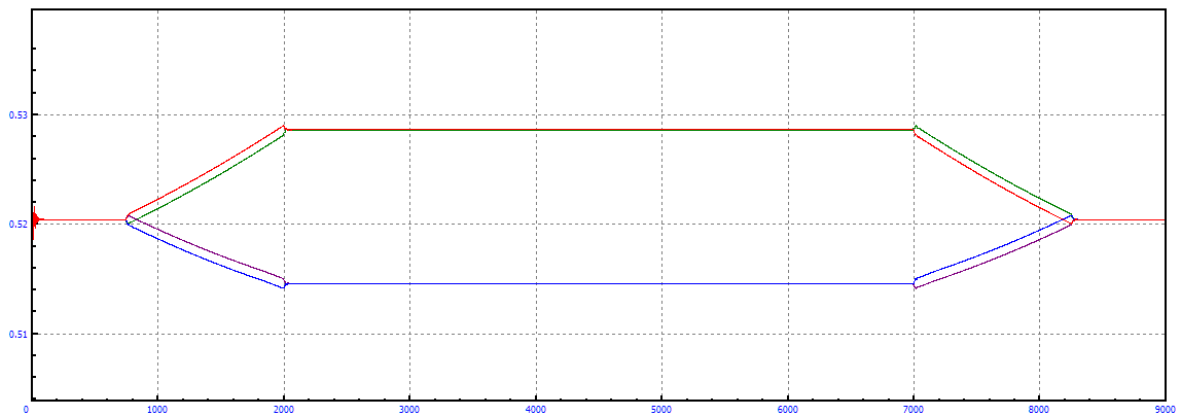


Figura A.37: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=15\text{m/s}$

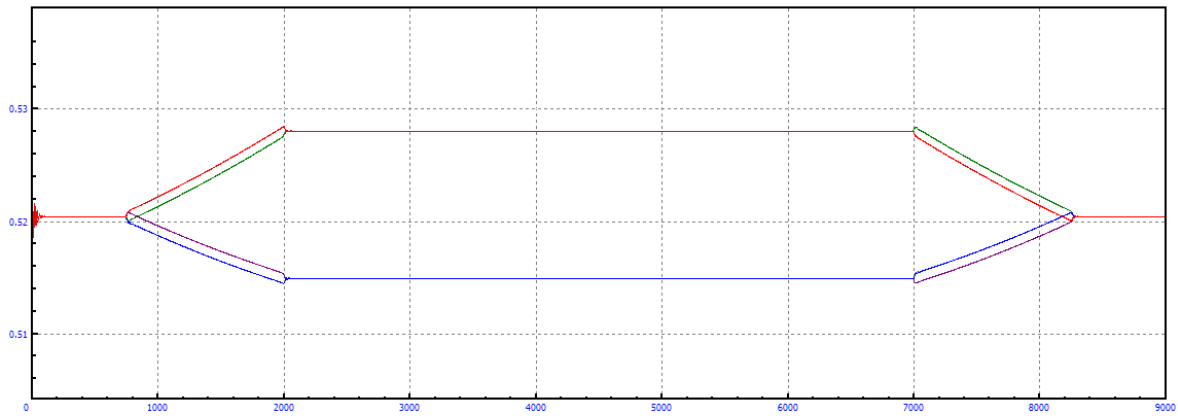


Figura A.38: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=20\text{m/s}$

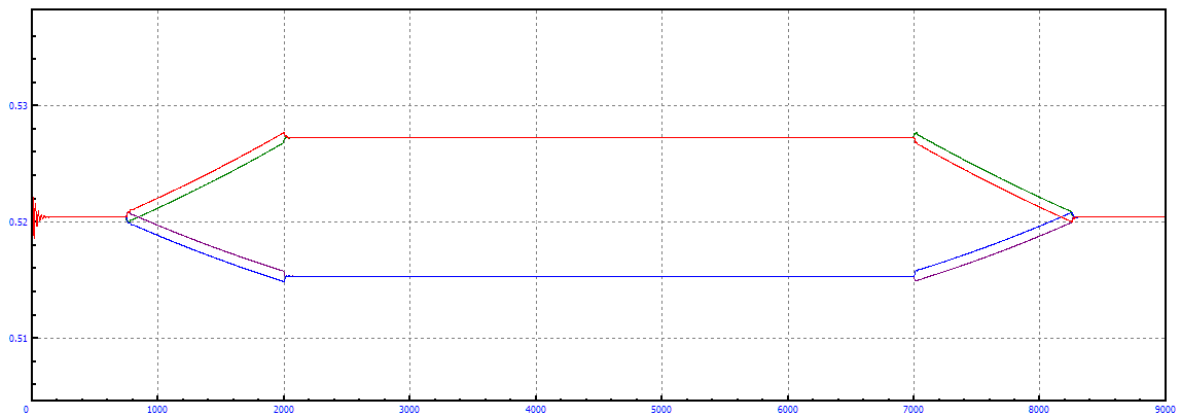


Figura A.39: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=25\text{m/s}$

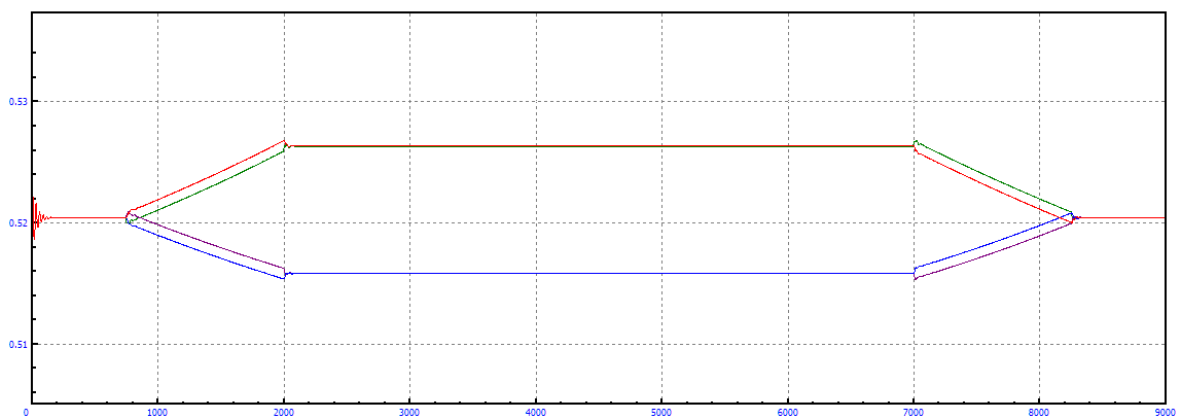


Figura A.40: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=30\text{m/s}$

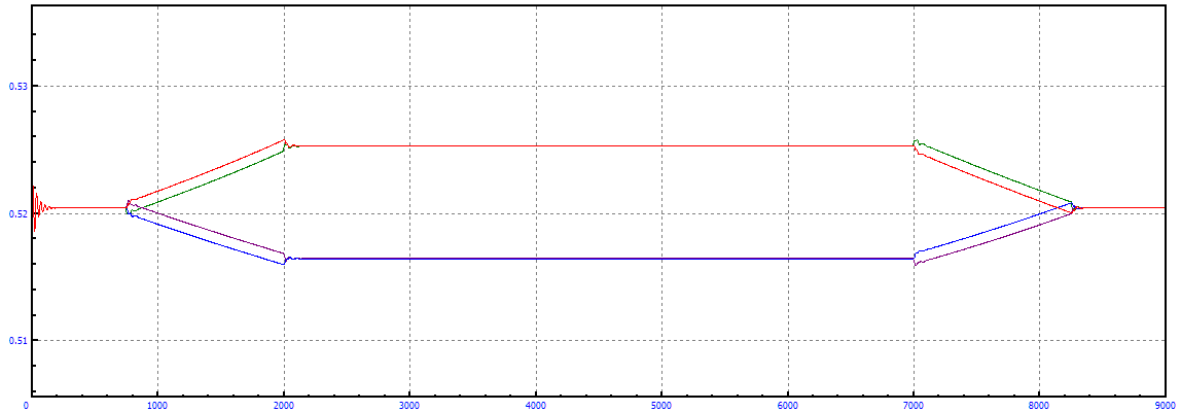


Figura A.41: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=35\text{m/s}$

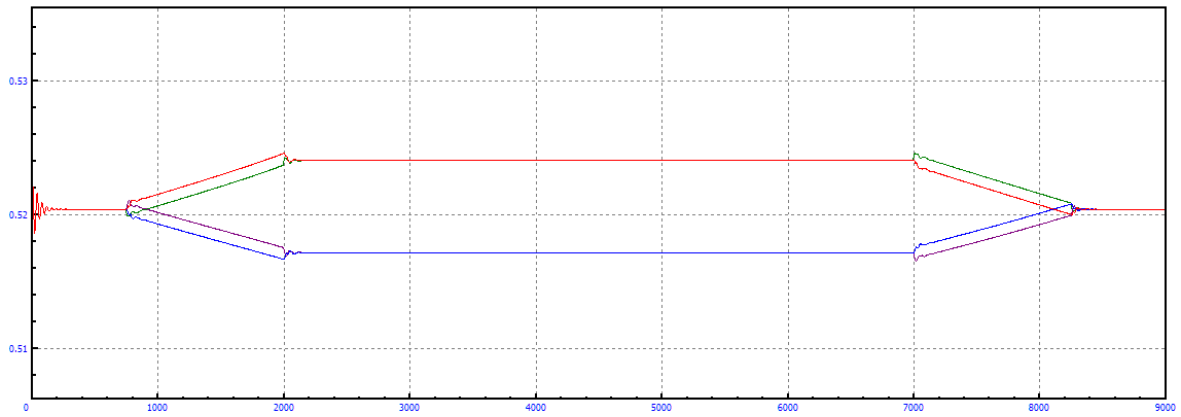


Figura A.42: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=40\text{m/s}$

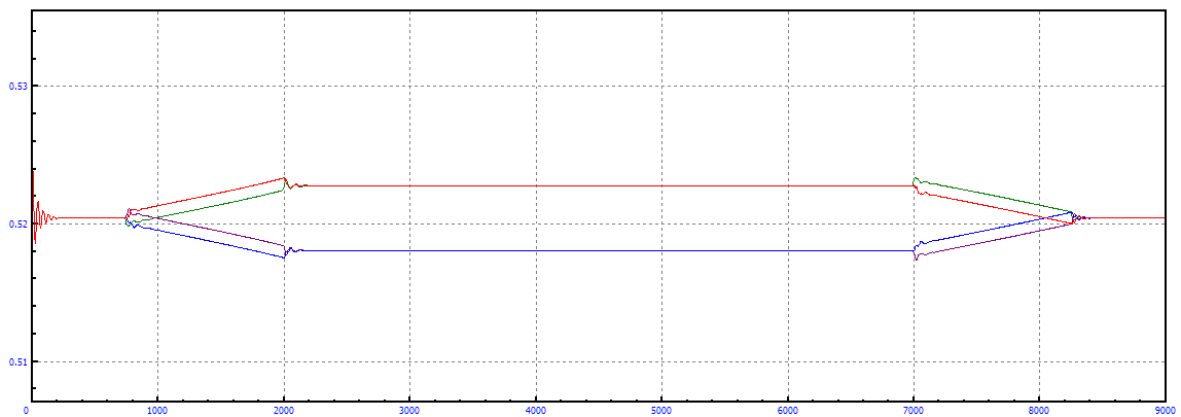


Figura A.43: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=45\text{m/s}$

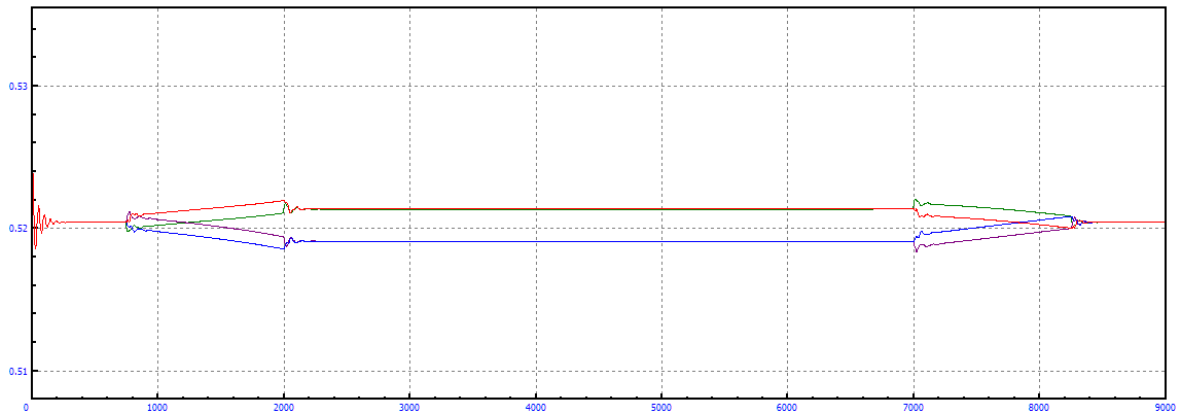


Figura A.44: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=50\text{m/s}$

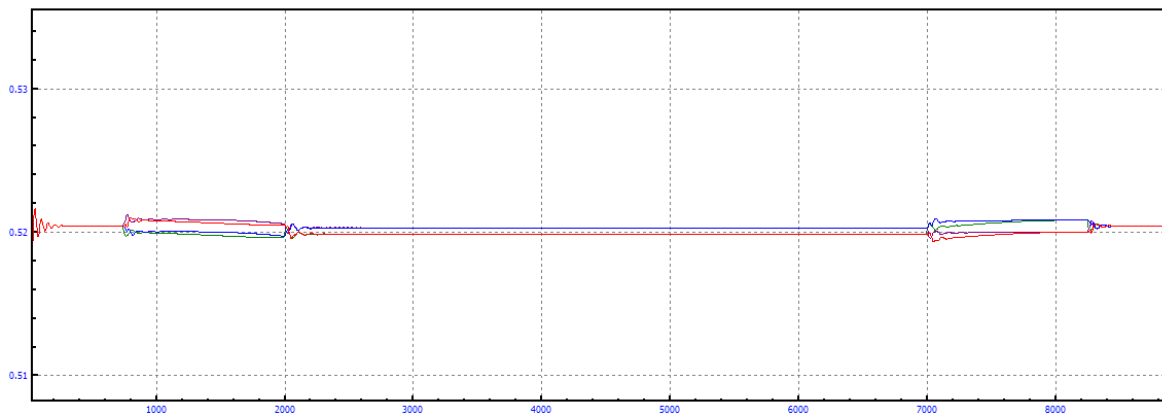


Figura A.45: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=55\text{m/s}$

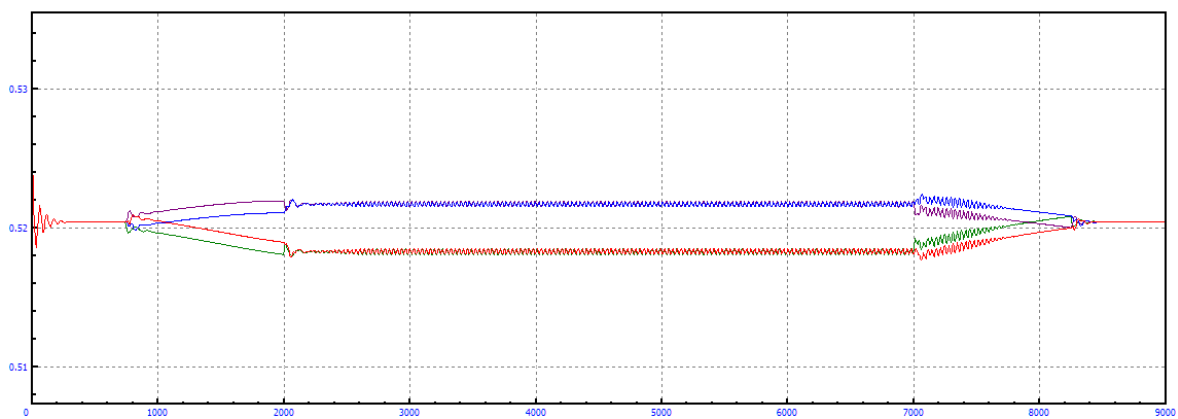


Figura A.46: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=60\text{m/s}$

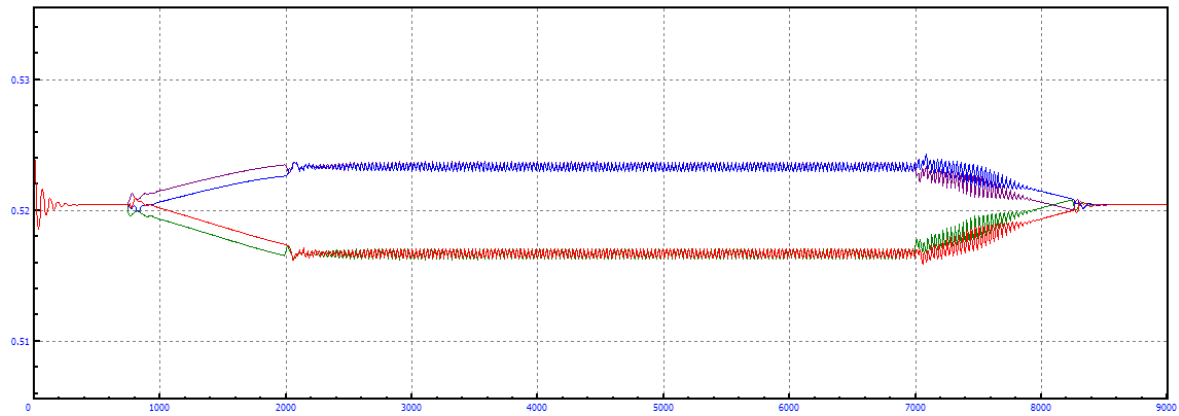


Figura A.47: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=65\text{m/s}$

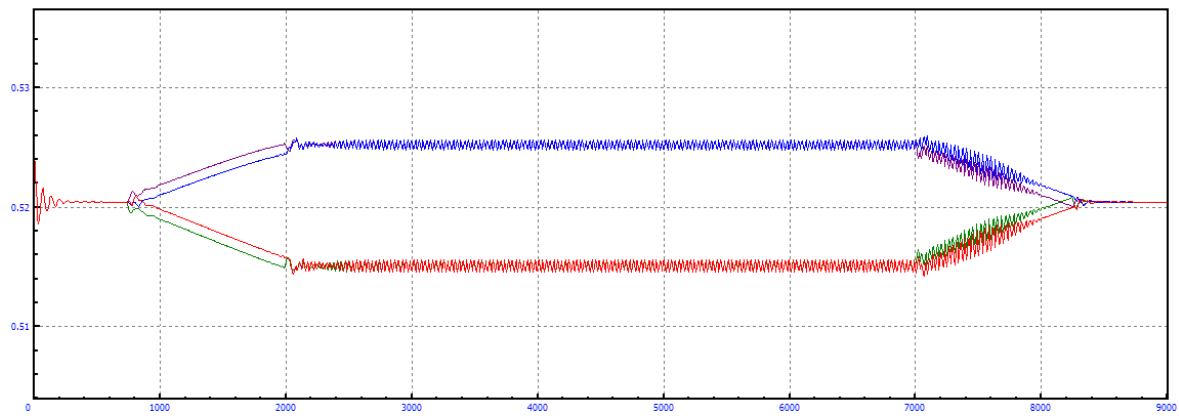


Figura A.48: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=70\text{m/s}$

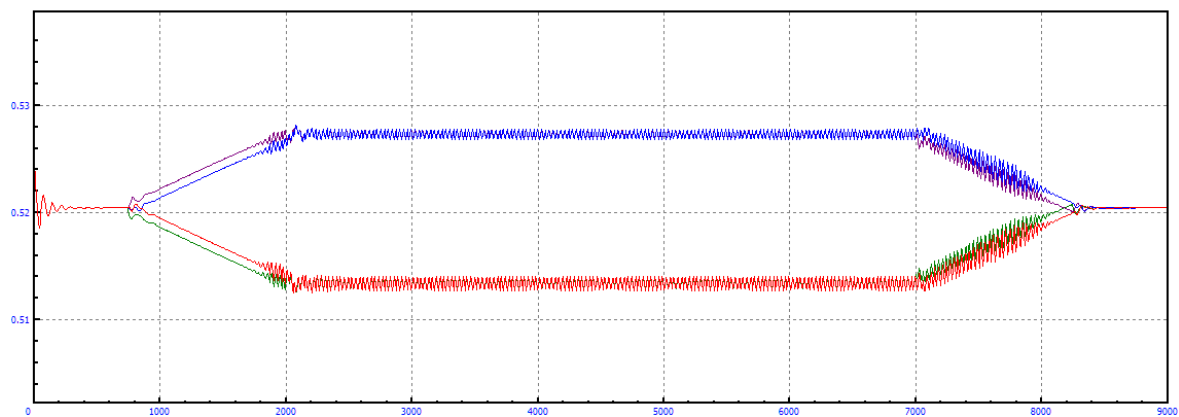


Figura A.49: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=75\text{m/s}$

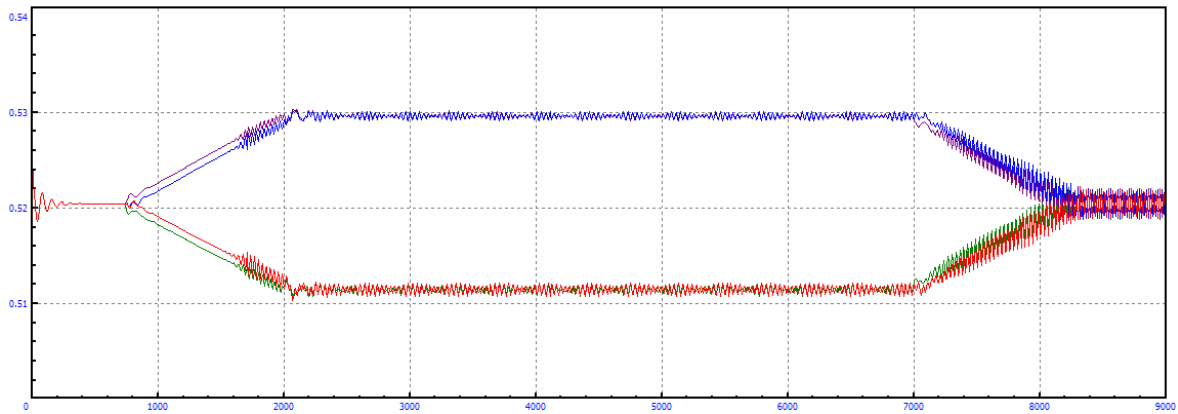


Figura A.50: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{ km}$ y $V=80\text{ m/s}$

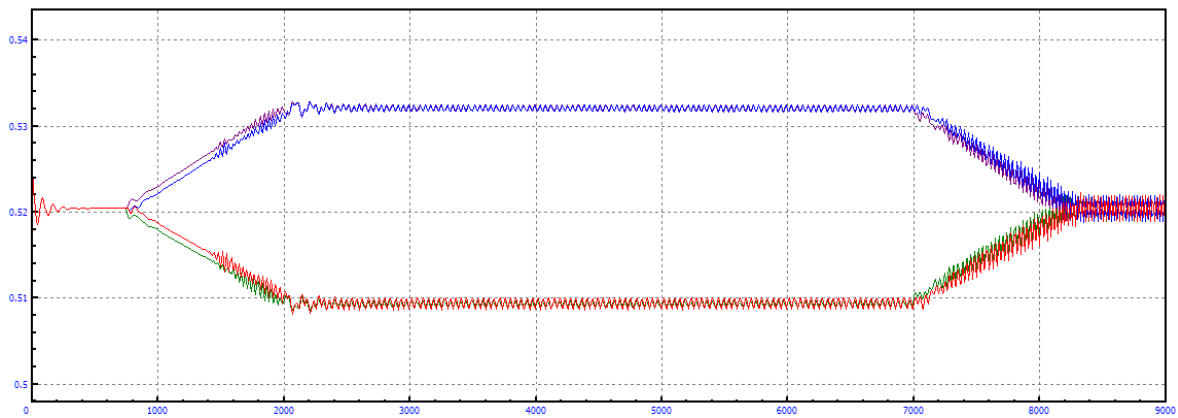


Figura A.51: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{ km}$ y $V=85\text{ m/s}$

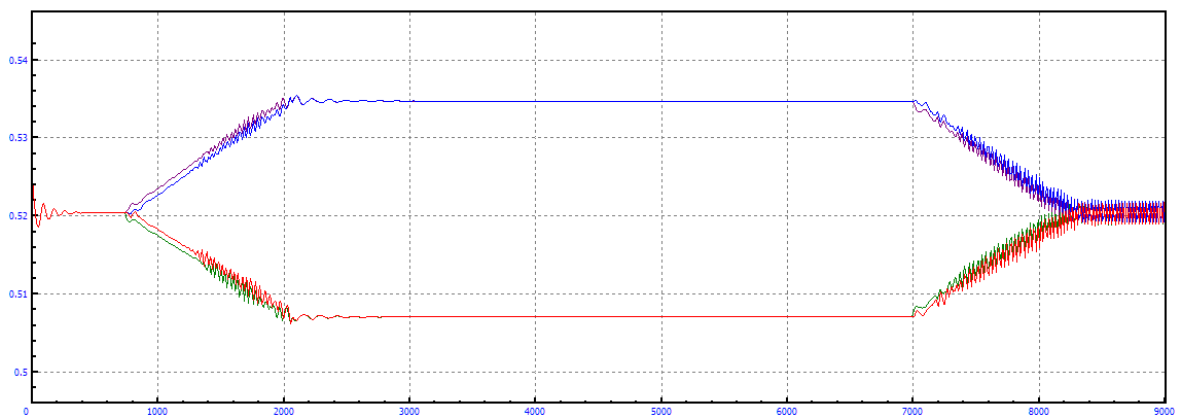


Figura A.52: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{ km}$ y $V=90\text{ m/s}$

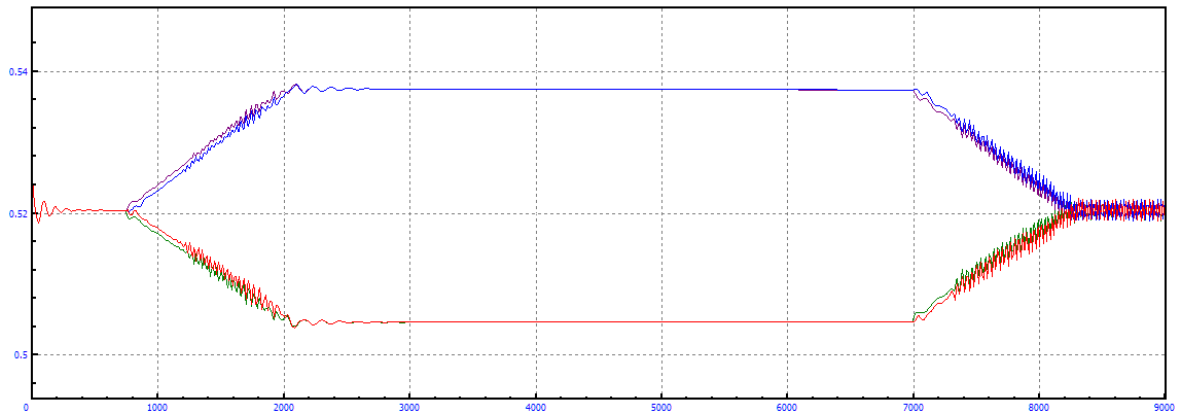


Figura A.53: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=95\text{m/s}$

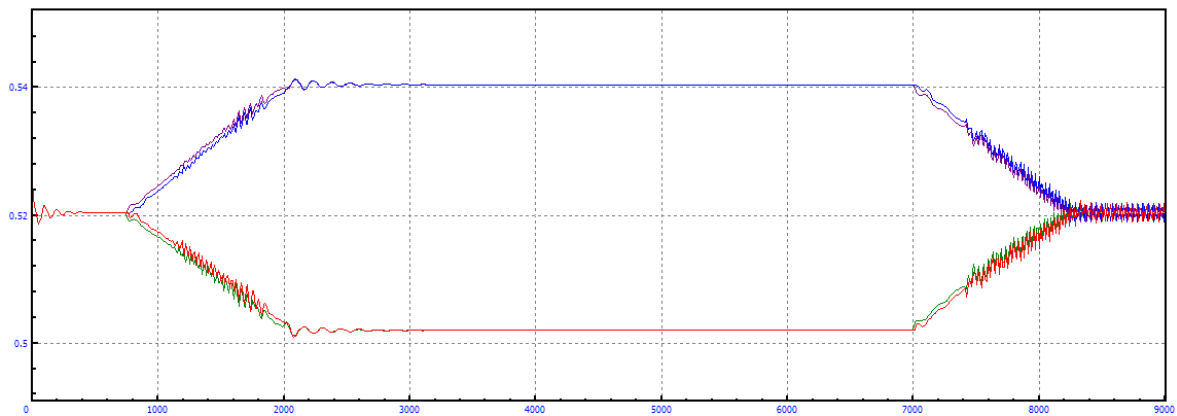


Figura A.54: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=100\text{m/s}$

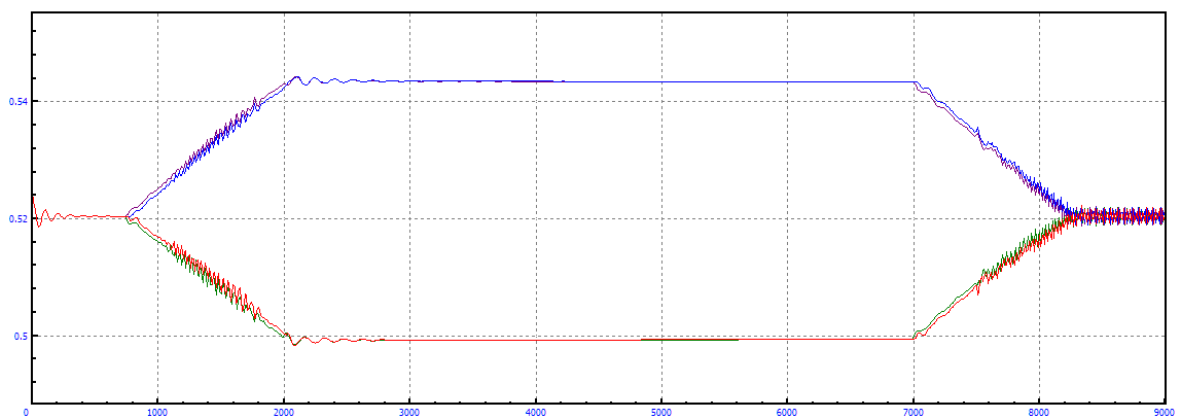


Figura A.55: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=105\text{m/s}$

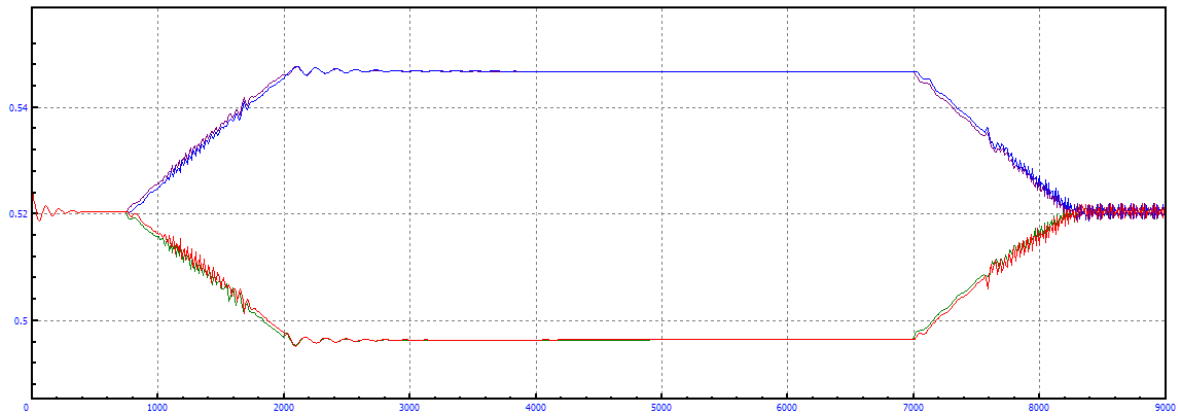


Figura A.56: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=110\text{m/s}$

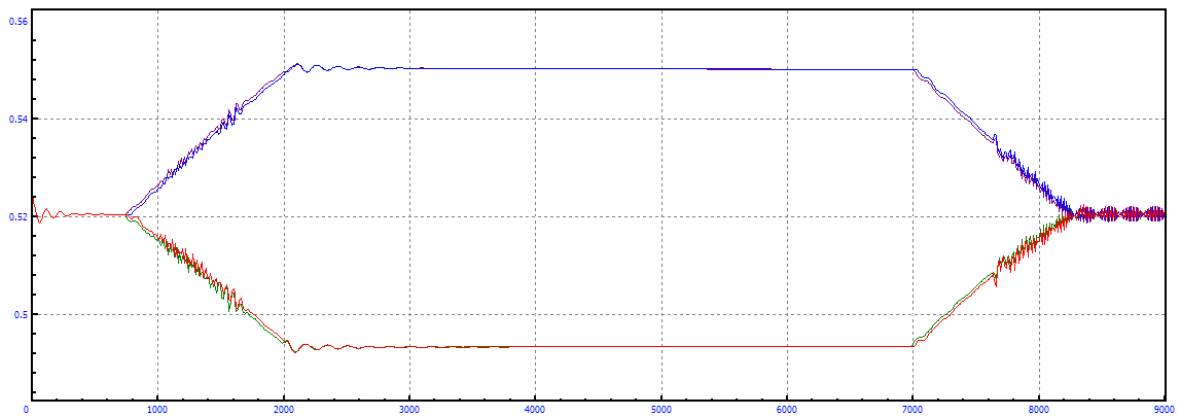


Figura A.57: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=115\text{m/s}$

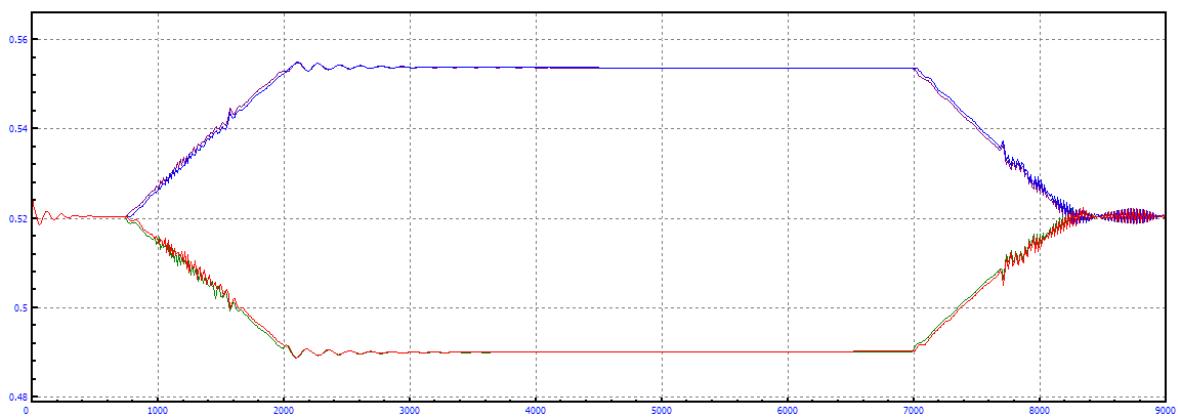


Figura A.58: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=120\text{m/s}$

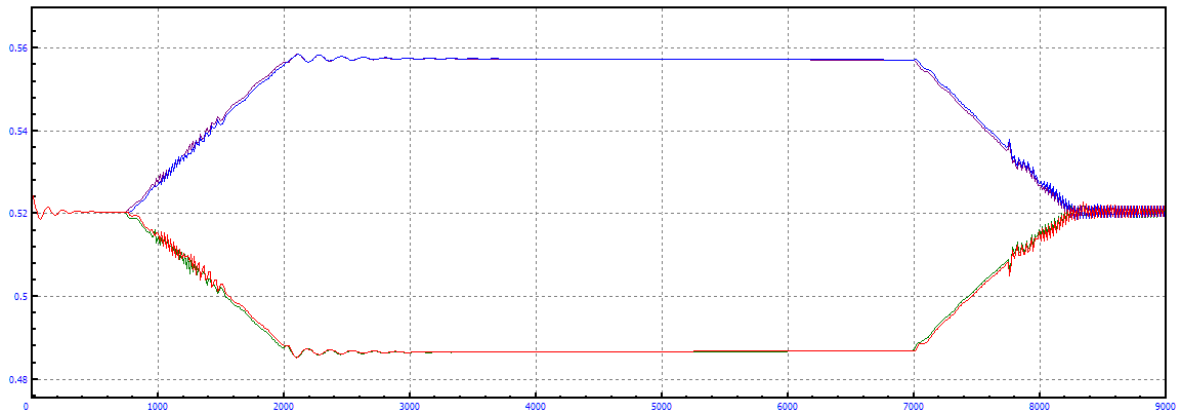


Figura A.59: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=125\text{m/s}$

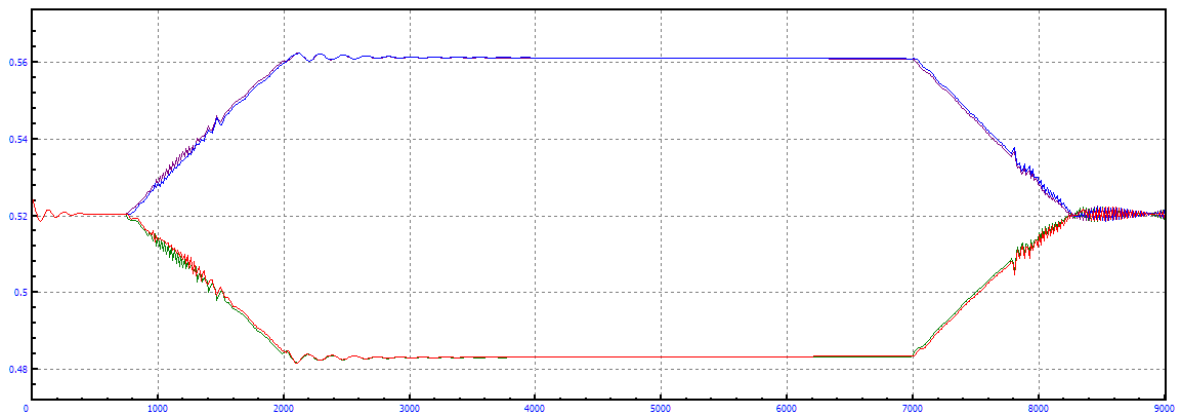


Figura A.60: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=130\text{m/s}$

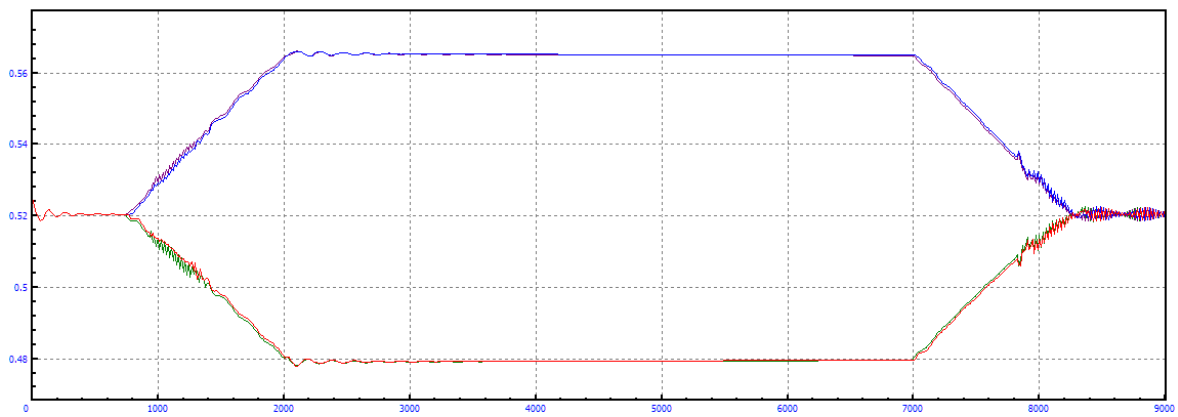


Figura A.61: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=135\text{m/s}$

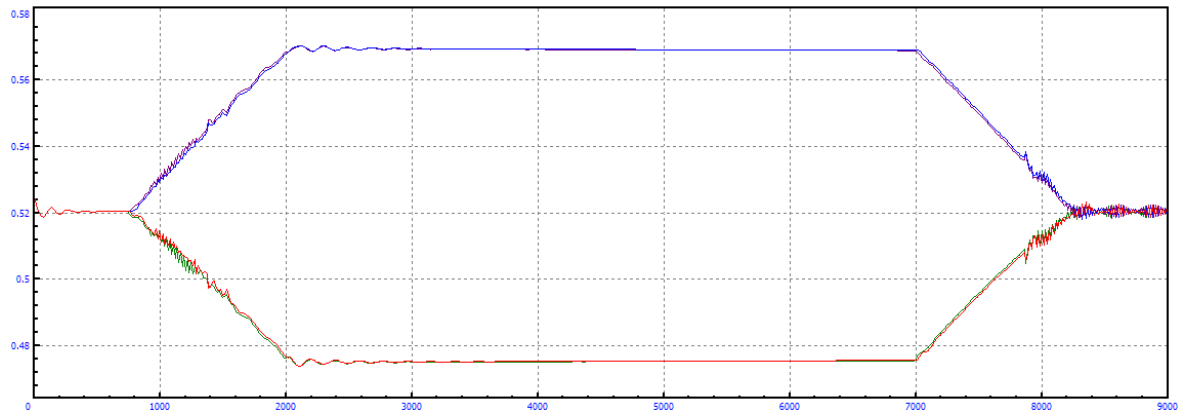


Figura A.62: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=140\text{m/s}$

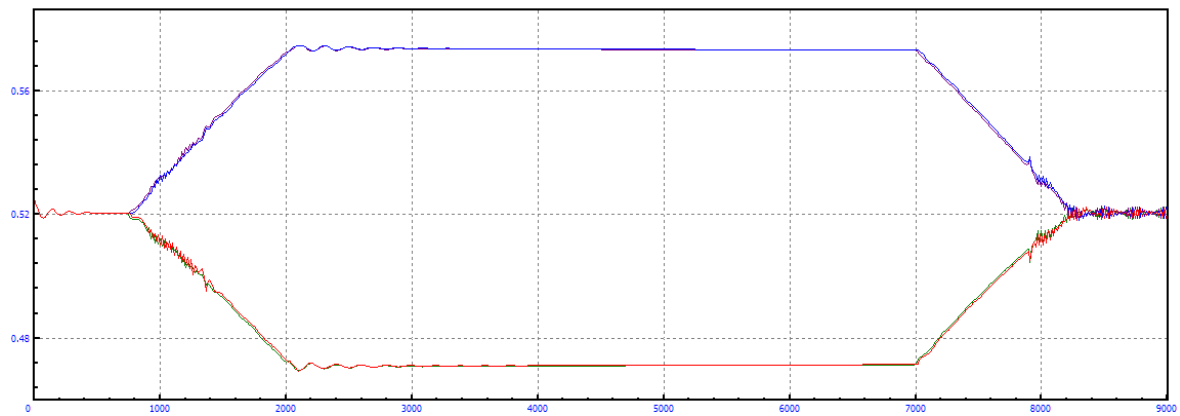


Figura A.63: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=145\text{m/s}$

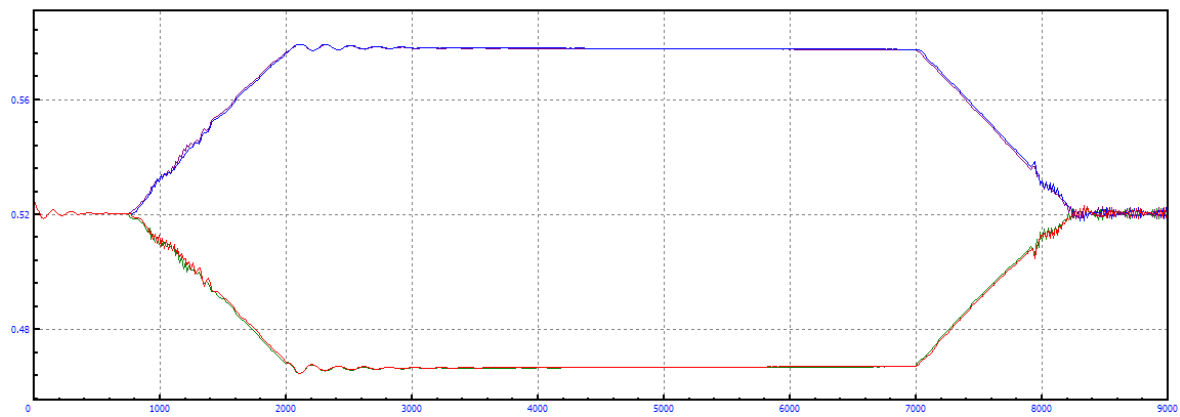


Figura A.64: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=150\text{m/s}$

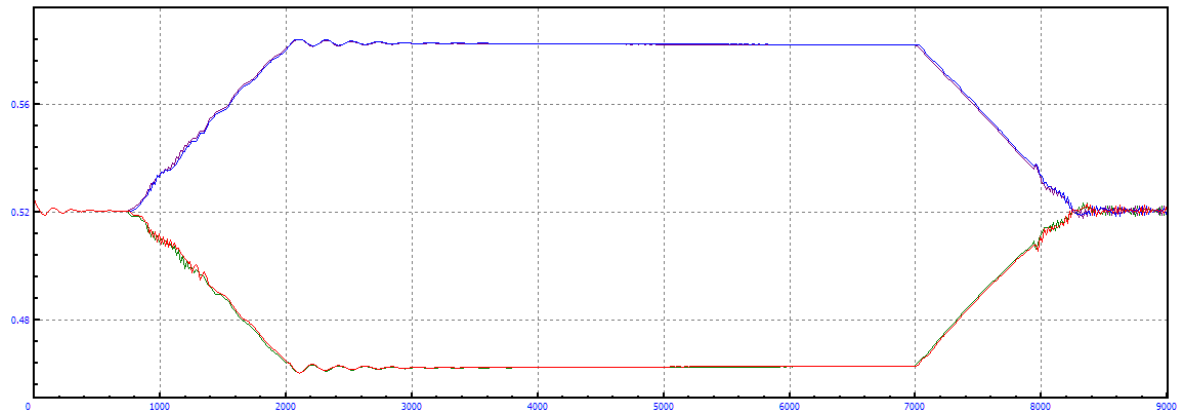


Figura A.65: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=155\text{m/s}$

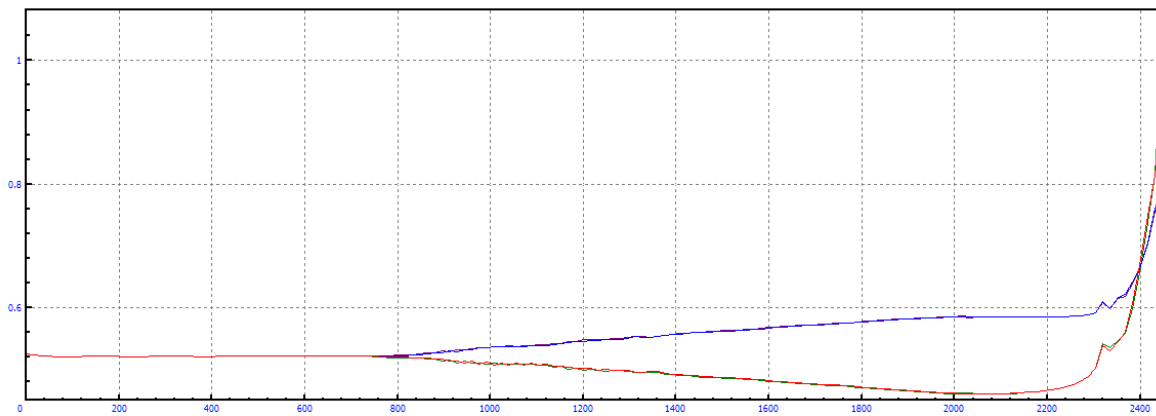


Figura A.66: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$ y $V=160\text{m/s}$

B. EXPERIMENTO 2

B.1 RADIO 1KM

B.1.1 MODIFICACIÓN=-80%

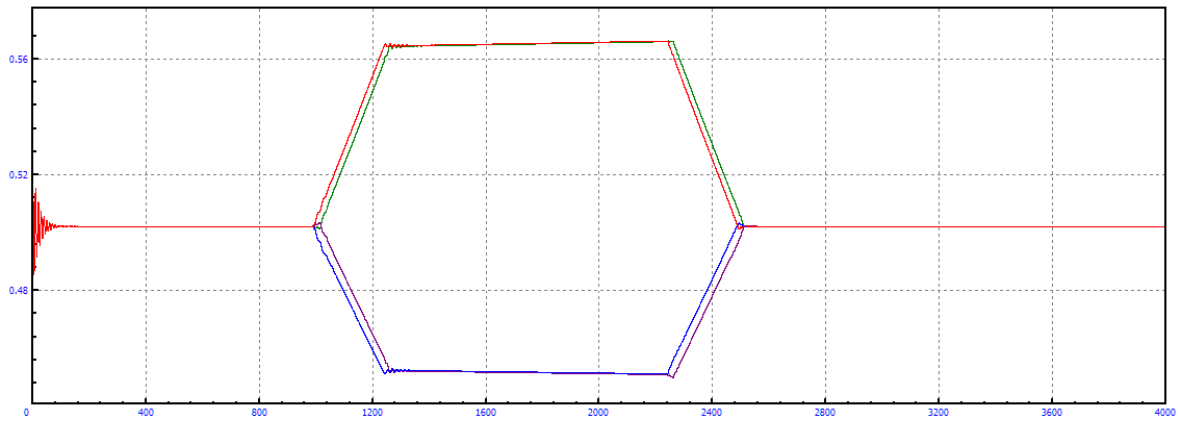


Figura A.67: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=5\text{m/s}$

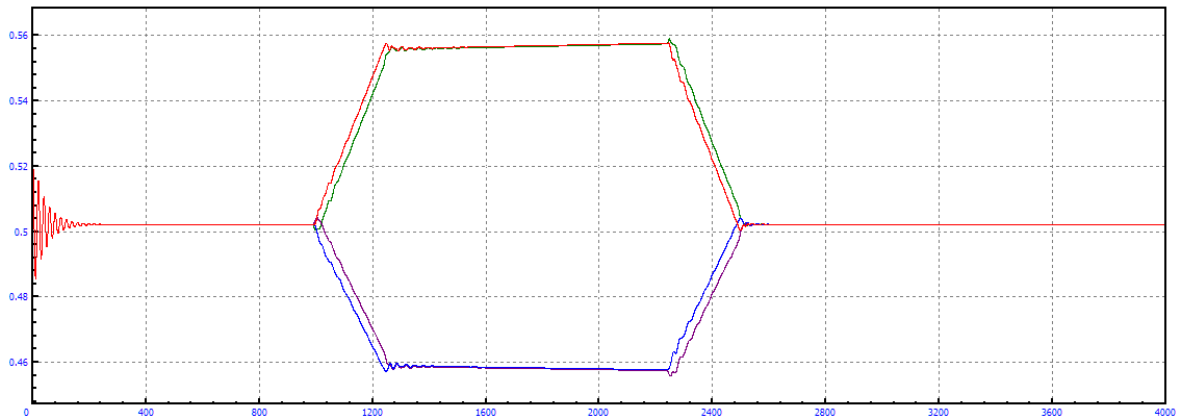


Figura A.68: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=10\text{m/s}$

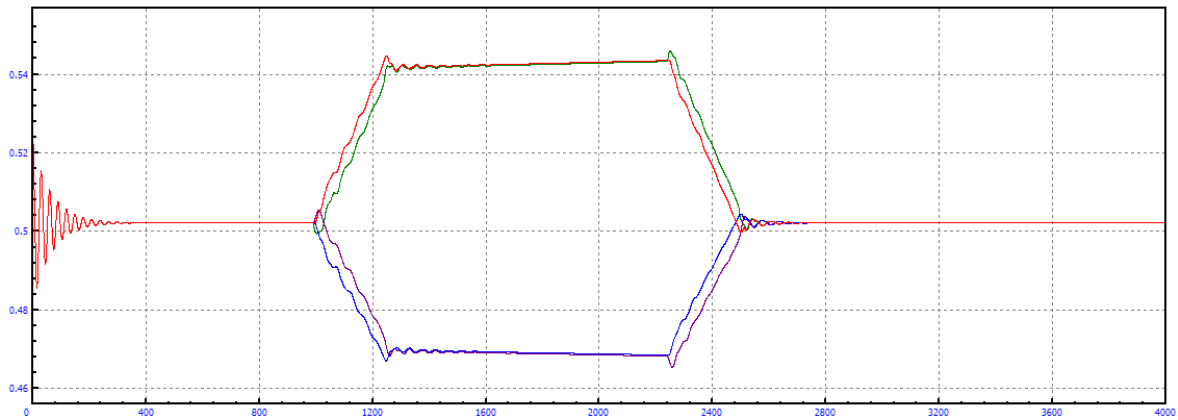


Figura A.69: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=15\text{m/s}$

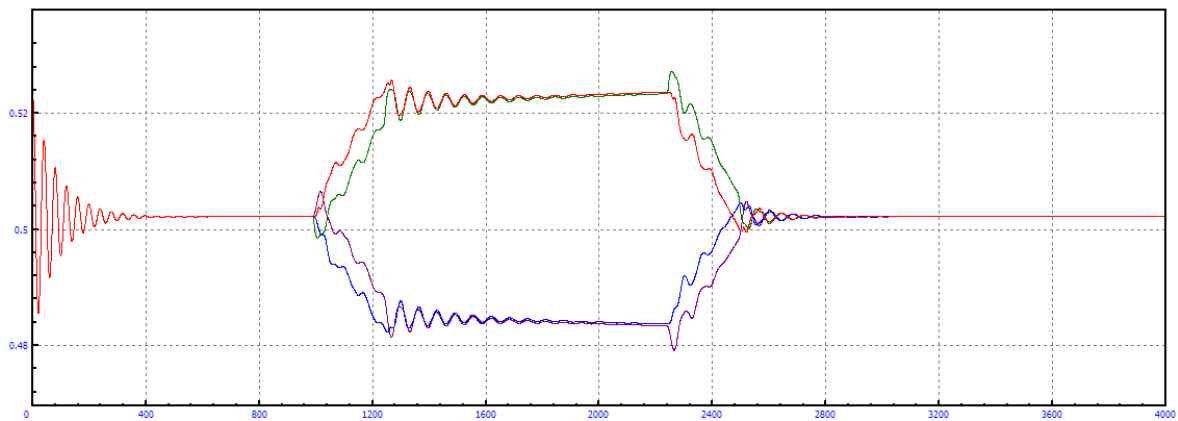


Figura A.70: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=20\text{m/s}$

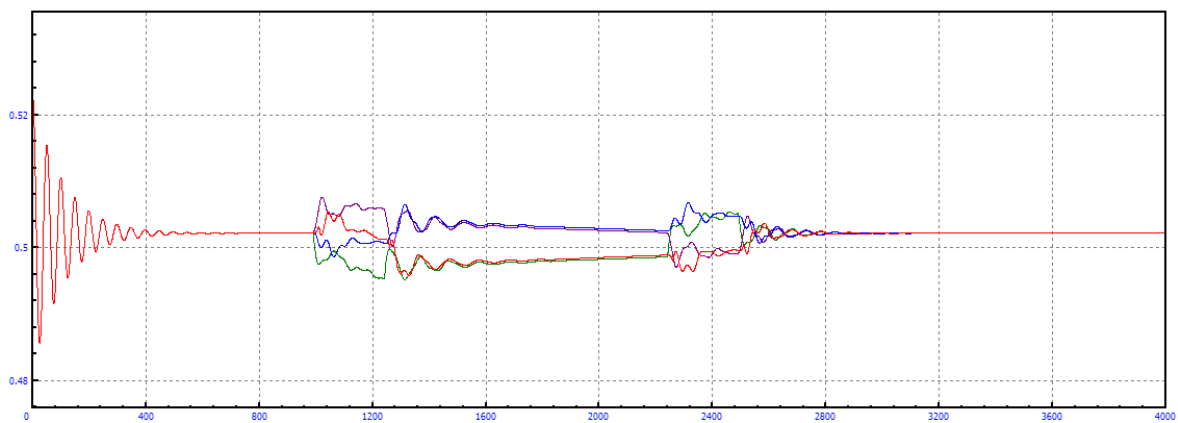


Figura A.71: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=25\text{m/s}$

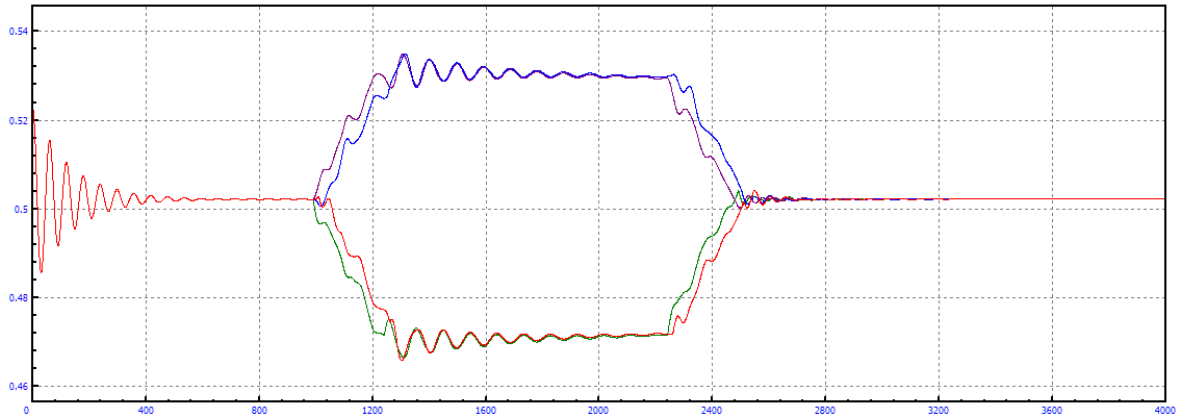


Figura A.72: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=30\text{m/s}$

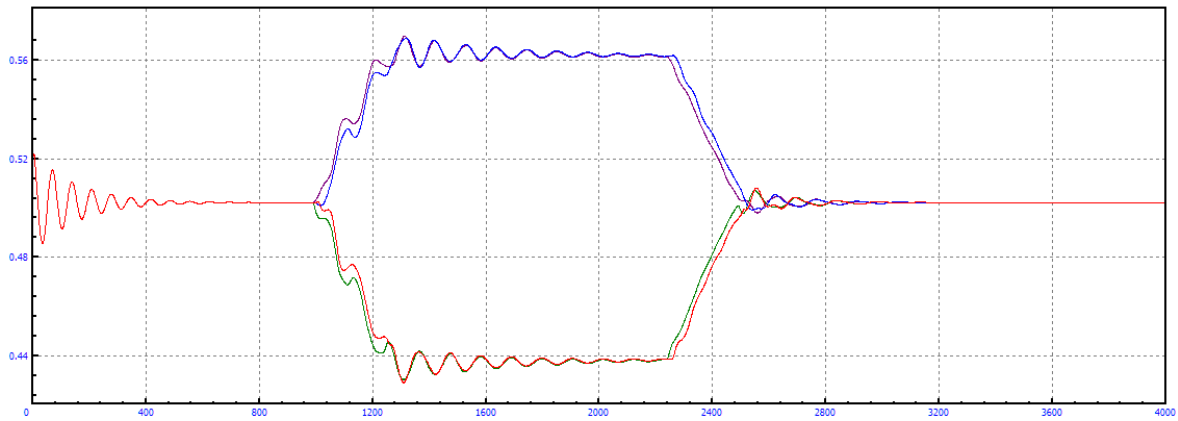


Figura A.73: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=35\text{m/s}$

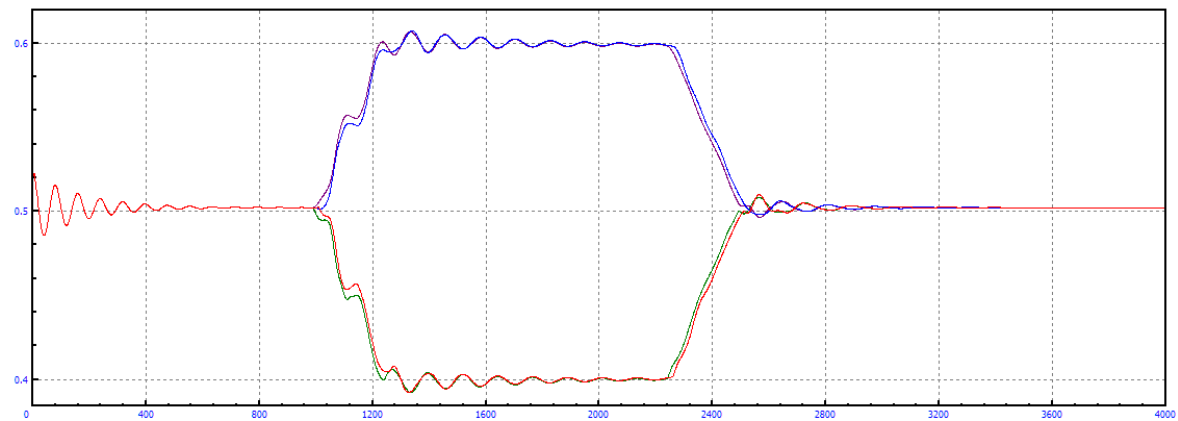


Figura A.74: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=40\text{m/s}$

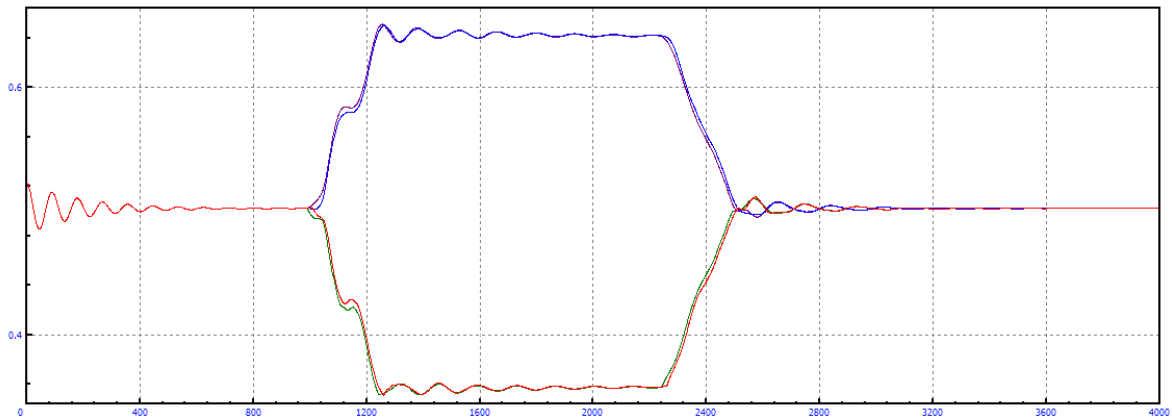


Figura A.75: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=45\text{m/s}$

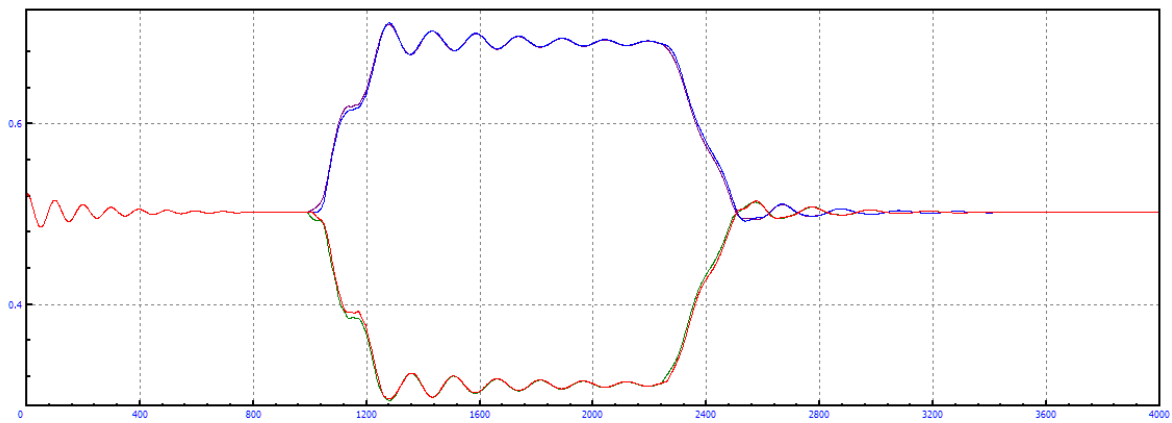


Figura A.76: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=50\text{m/s}$

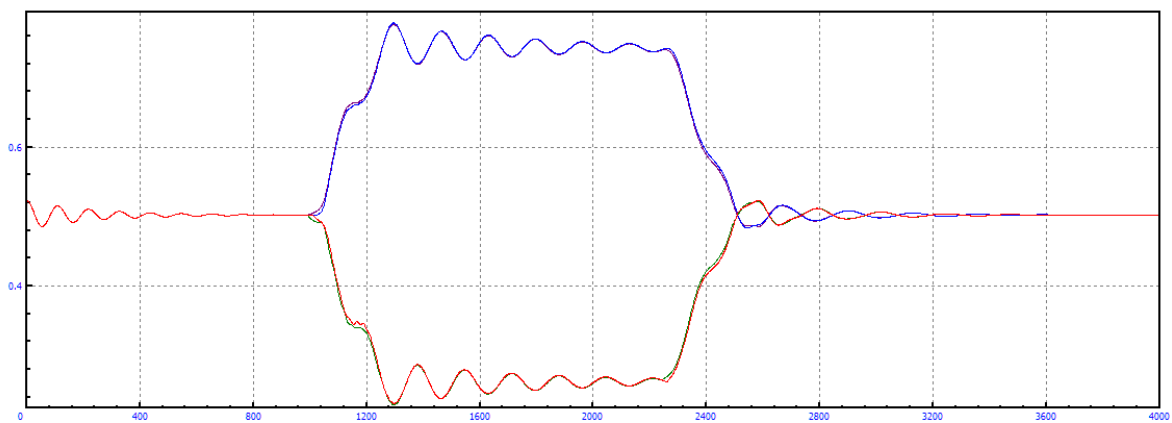


Figura A.77: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=55\text{m/s}$

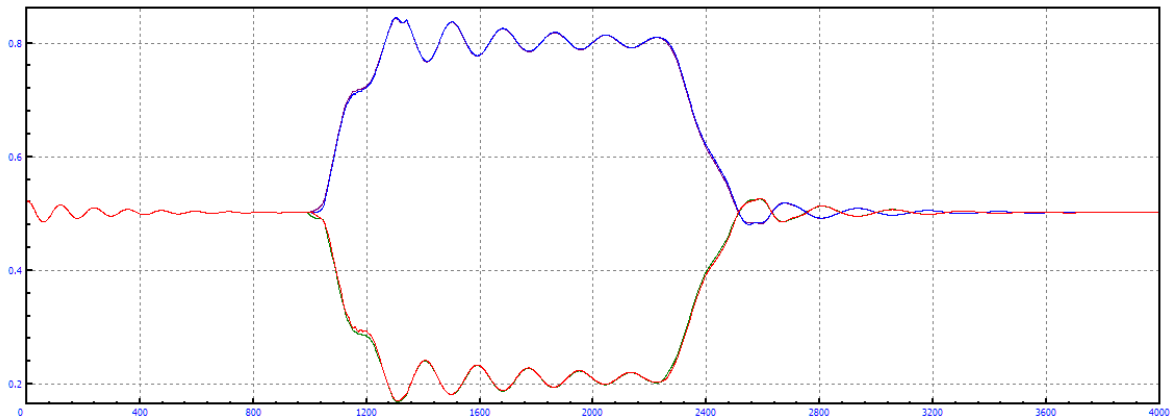


Figura A.78: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=60\text{m/s}$

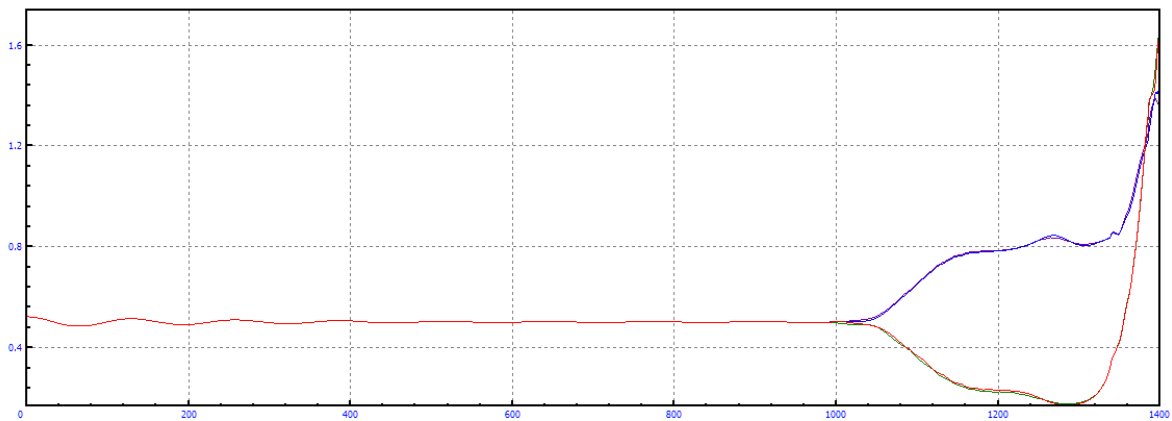


Figura A.79: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=65\text{m/s}$

B.1.2 MODIFICACIÓN=-60%

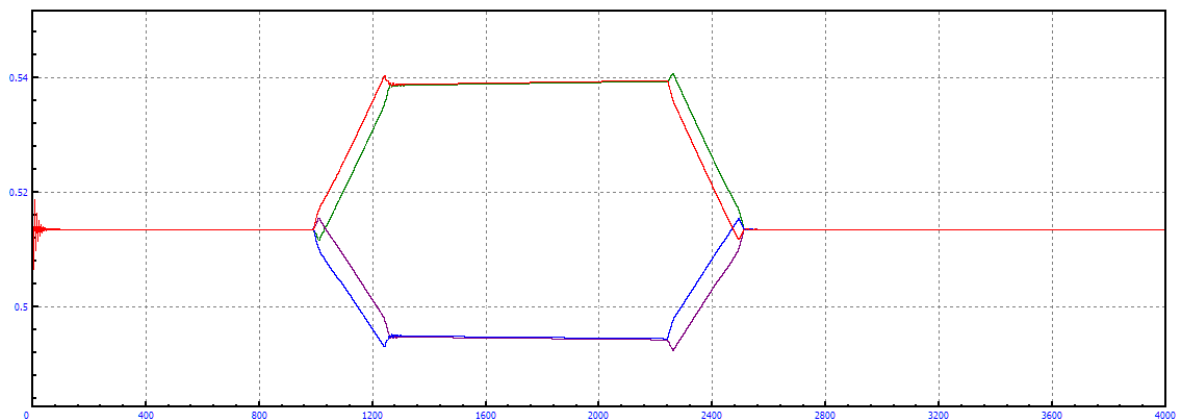


Figura A.80: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=5\text{m/s}$

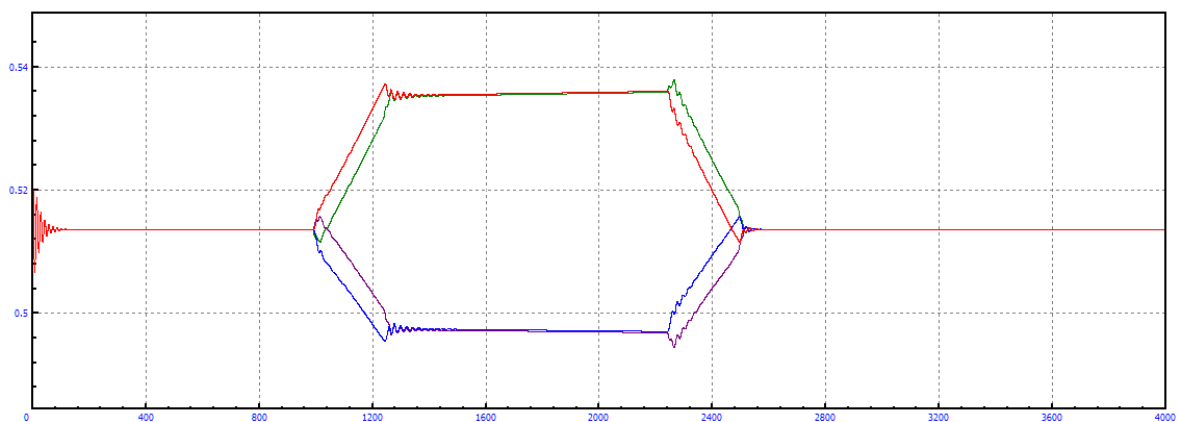


Figura A.81: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=10\text{m/s}$

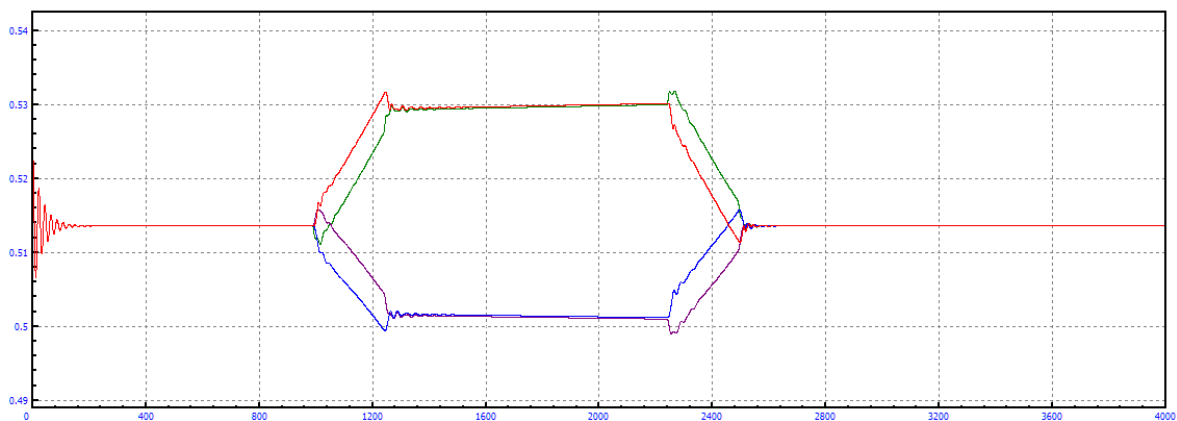


Figura A.82: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=15\text{m/s}$

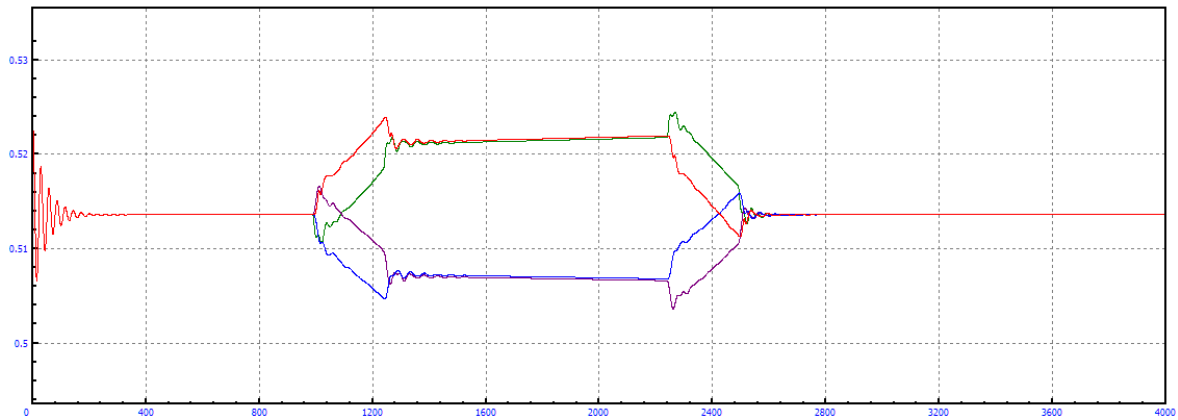


Figura A.83: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=20\text{m/s}$

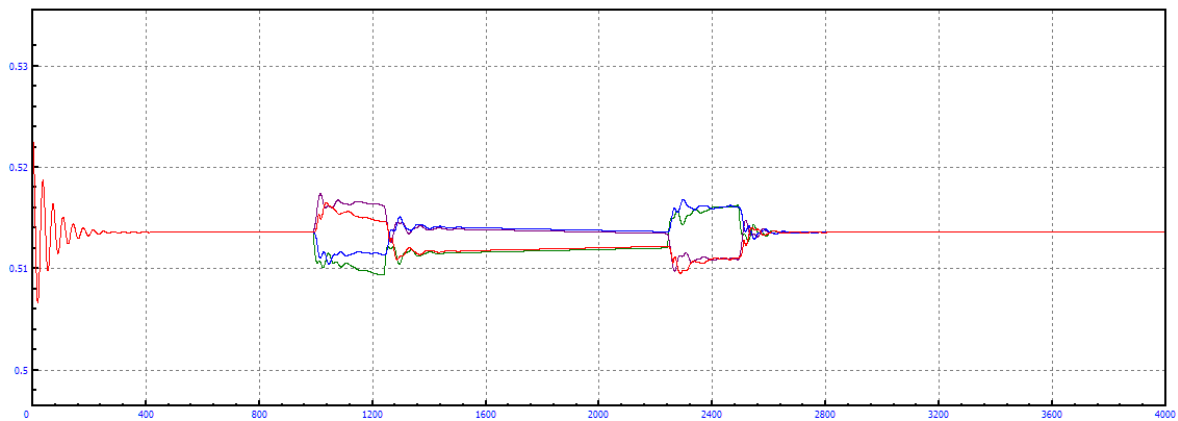


Figura A.84: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=25\text{m/s}$

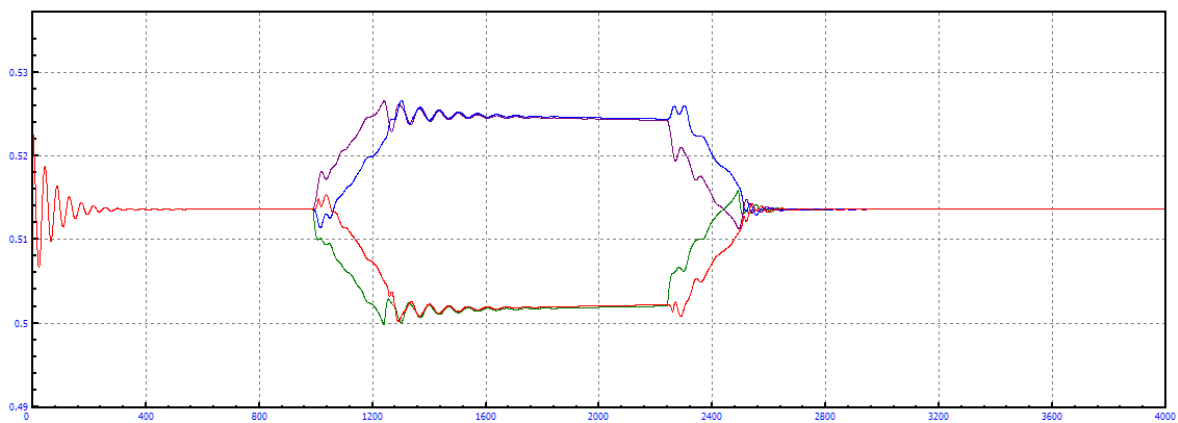


Figura A.85: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=30\text{m/s}$

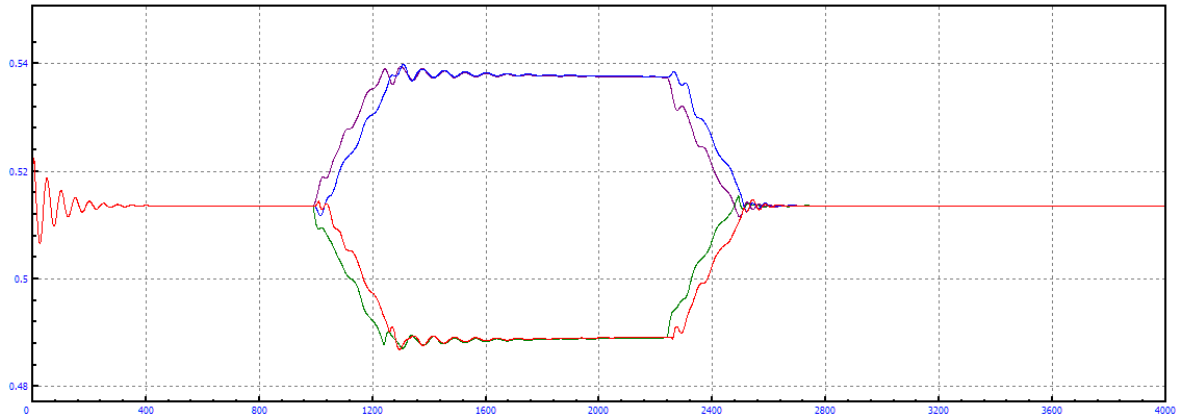


Figura A.86: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=35\text{m/s}$



Figura A.87: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=40\text{m/s}$

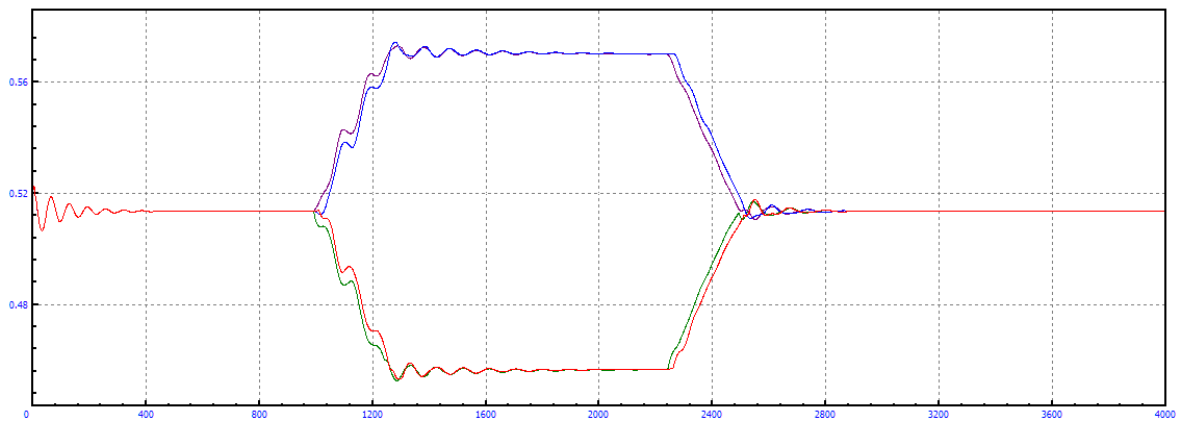


Figura A.88: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=45\text{m/s}$

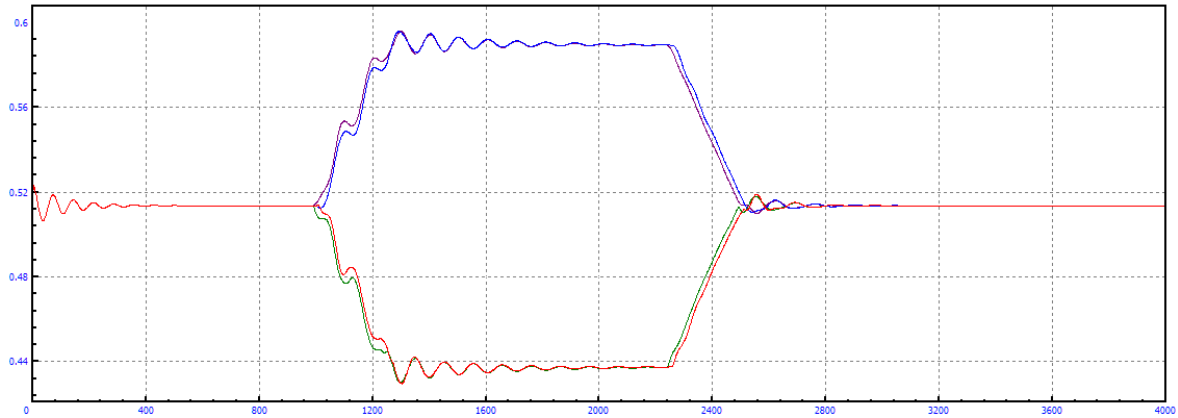


Figura A.89: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=50\text{m/s}$

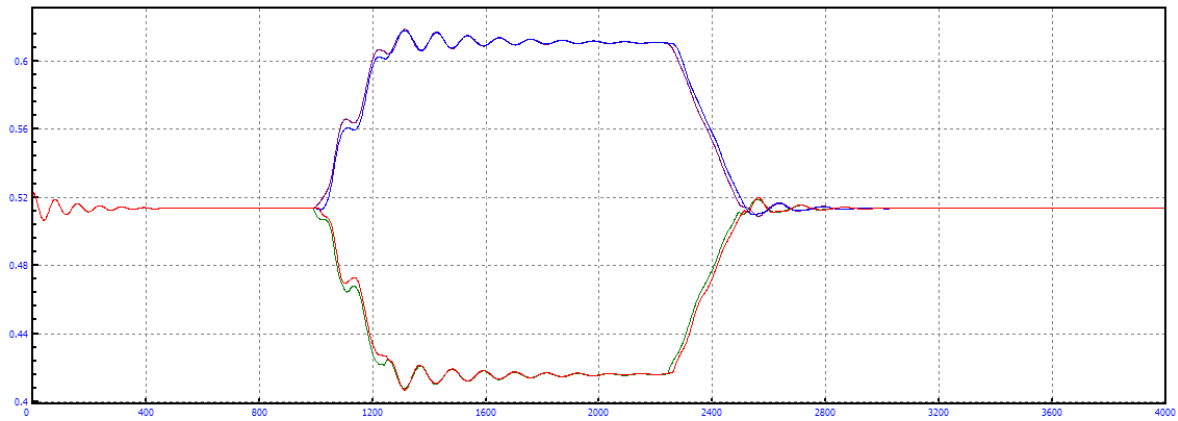


Figura A.90: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=55\text{m/s}$

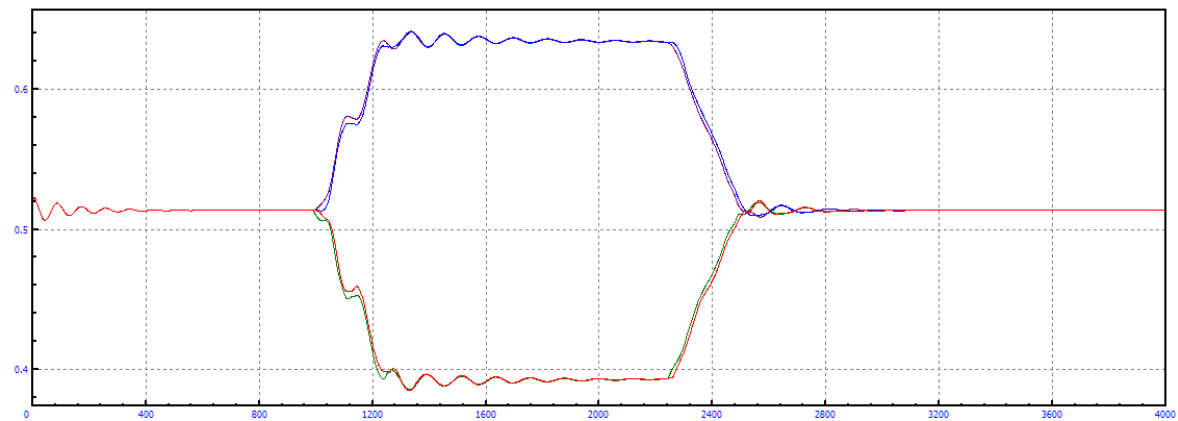


Figura A.91: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=60\text{m/s}$

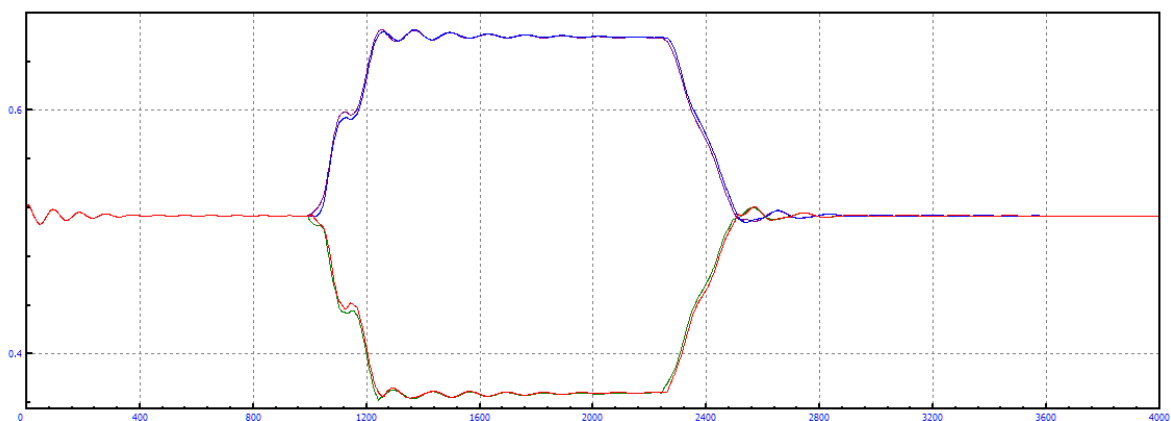


Figura A.92: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=65\text{m/s}$

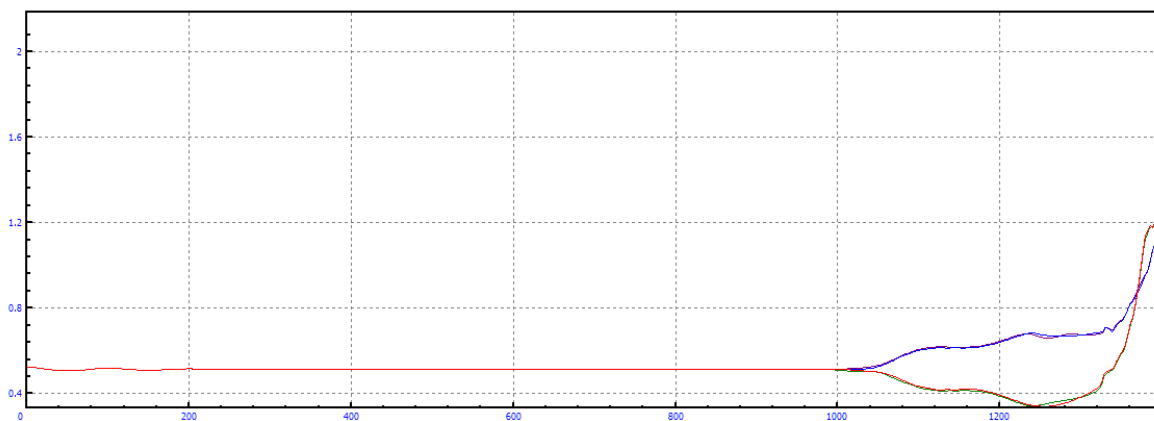


Figura A.93: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=70\text{m/s}$

B.1.3 MODIFICACIÓN=-40%

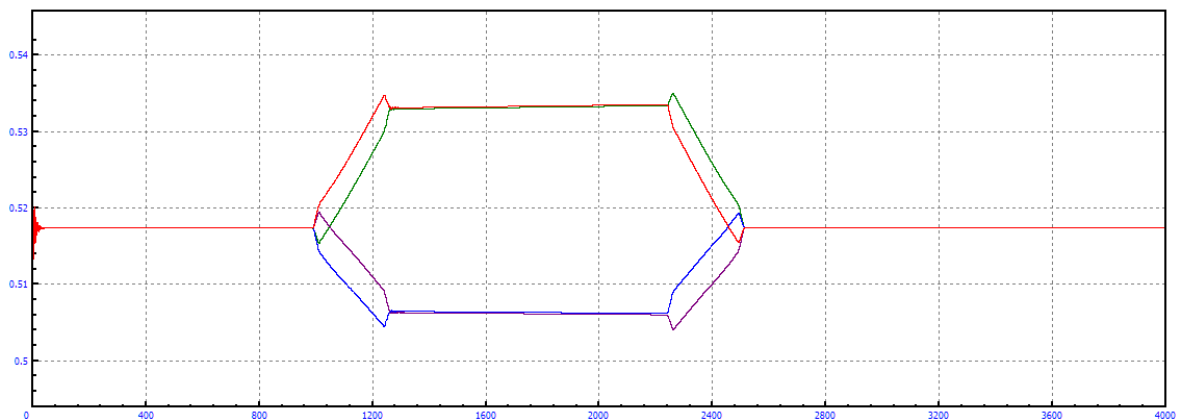


Figura A.94: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=5\text{m/s}$

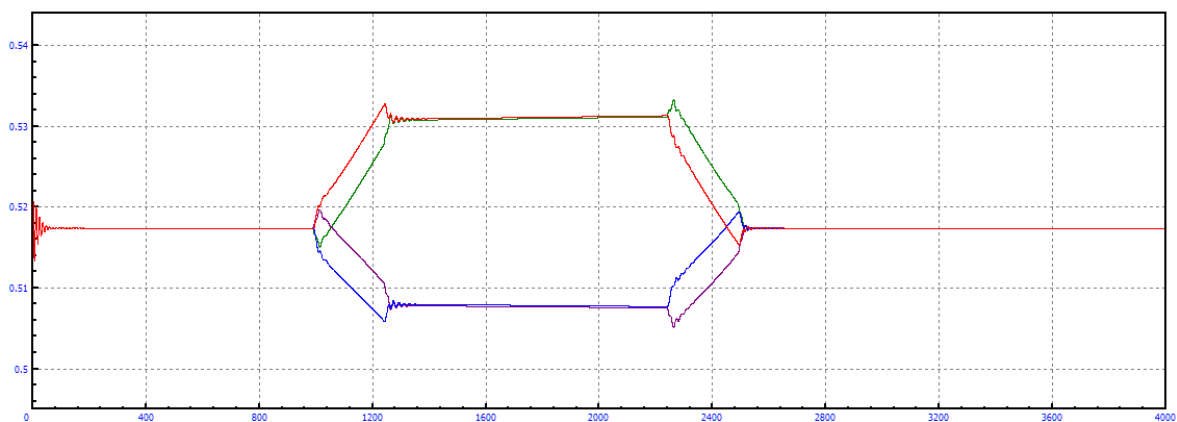


Figura A.95: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=10\text{m/s}$

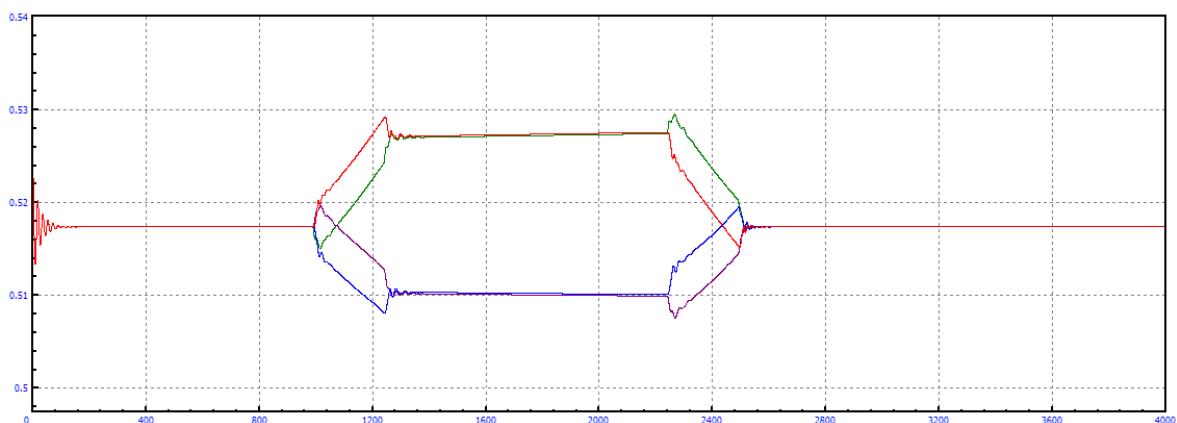


Figura A.96: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=15\text{m/s}$

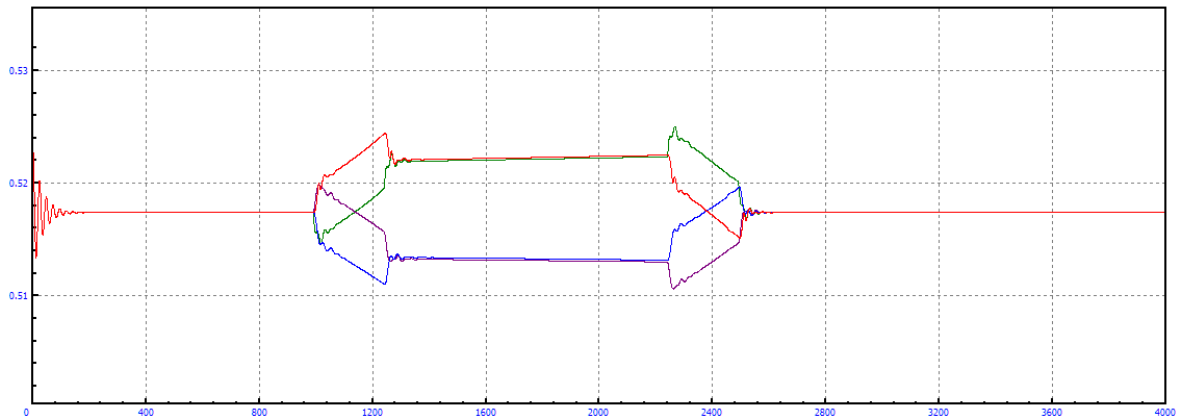


Figura A.97: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=20\text{m/s}$

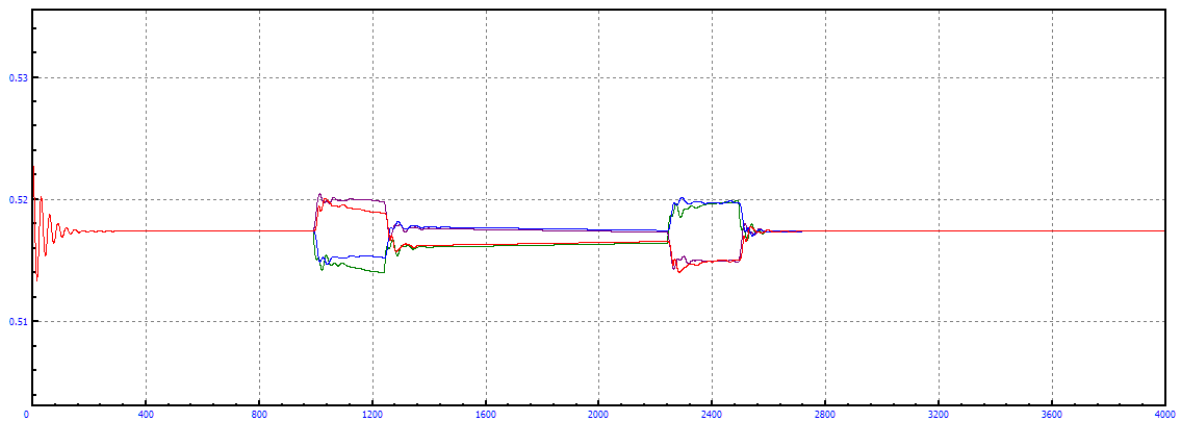


Figura A.98: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=25\text{m/s}$

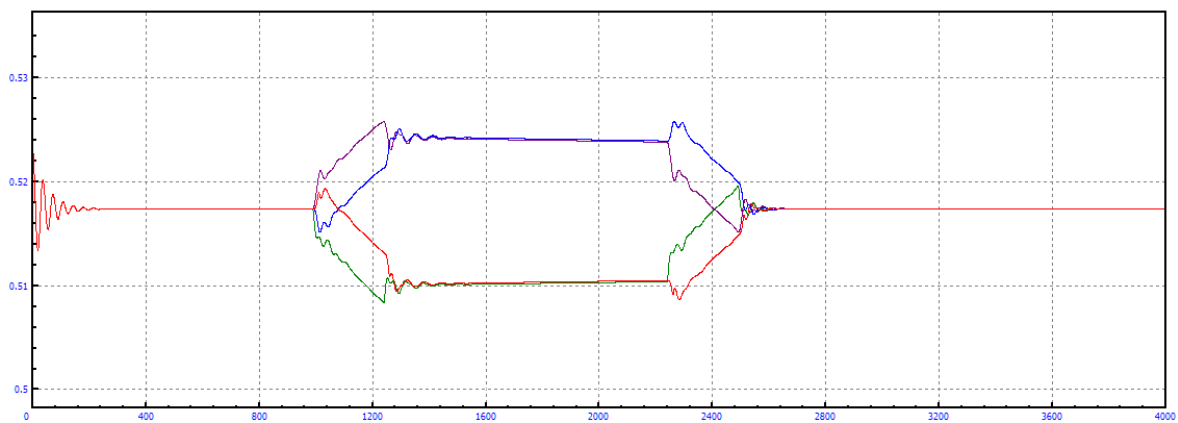


Figura A.99: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=30\text{m/s}$

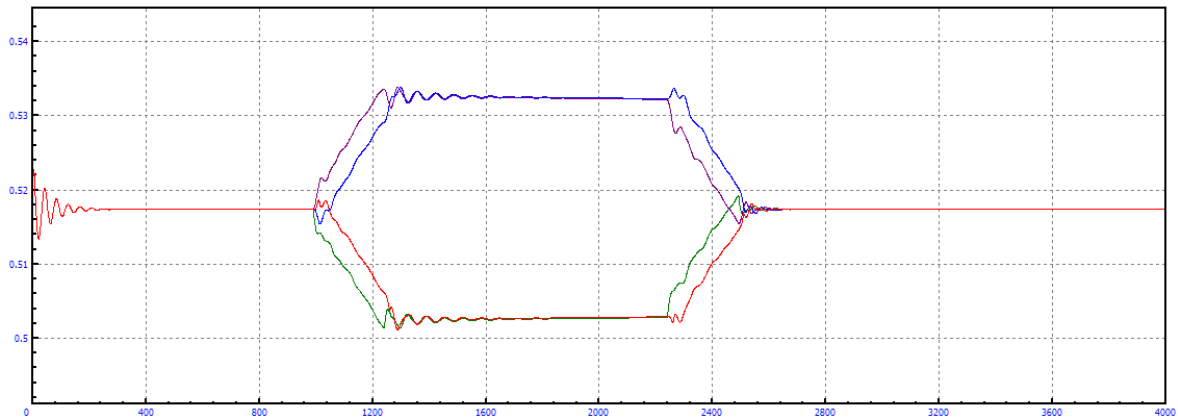


Figura A.100: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=35\text{m/s}$

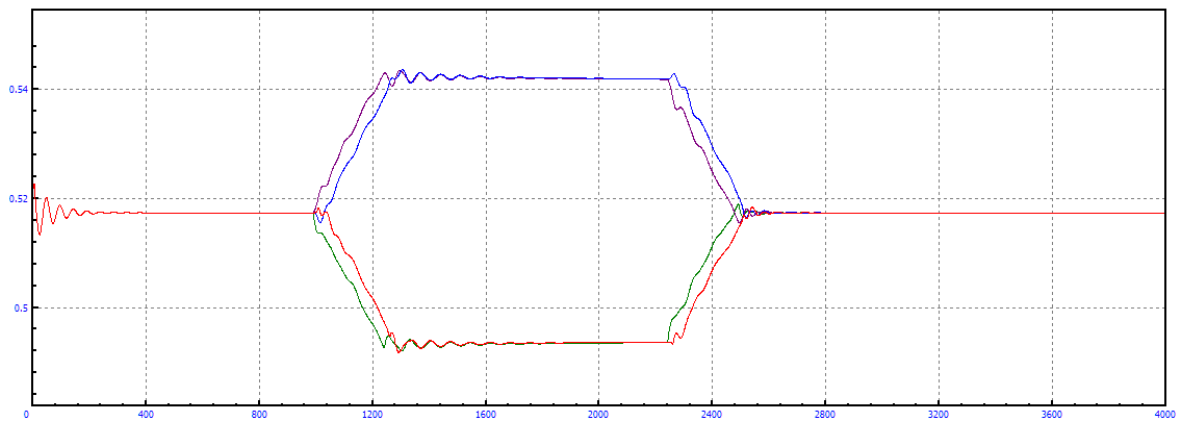


Figura A.101: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=40\text{m/s}$

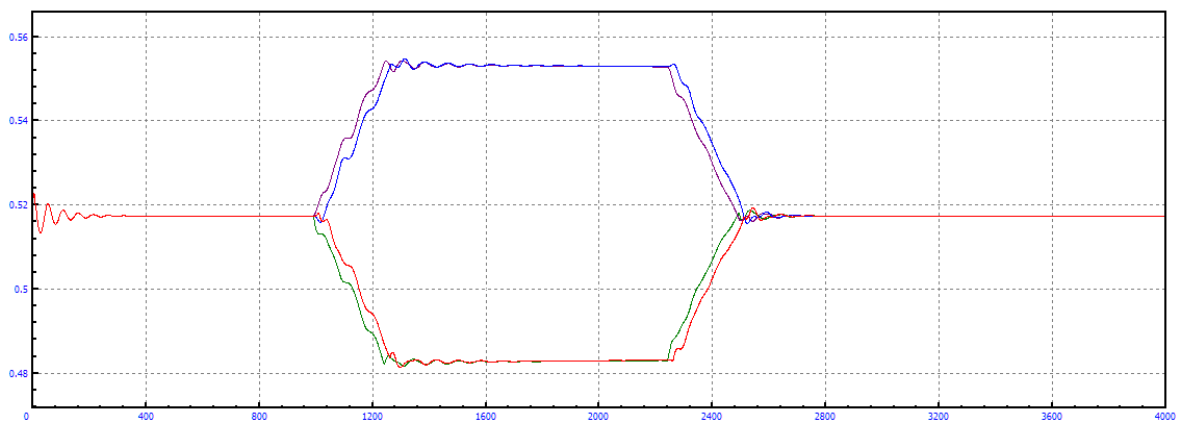


Figura A.102: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=45\text{m/s}$

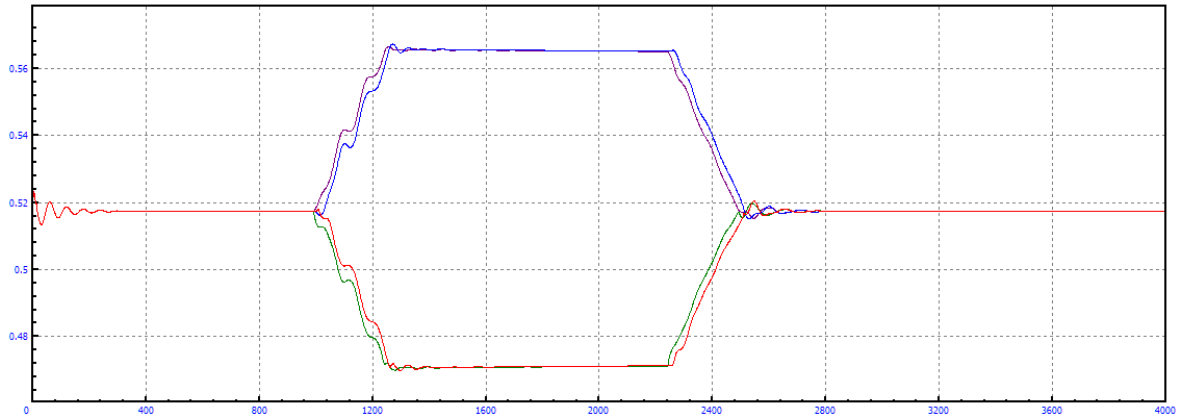


Figura A.103: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=50\text{m/s}$

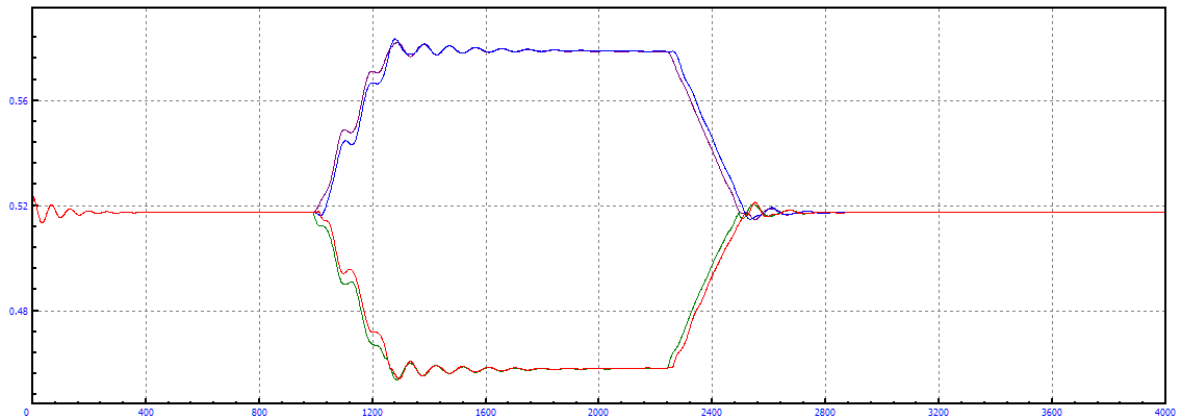


Figura A.104: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=55\text{m/s}$

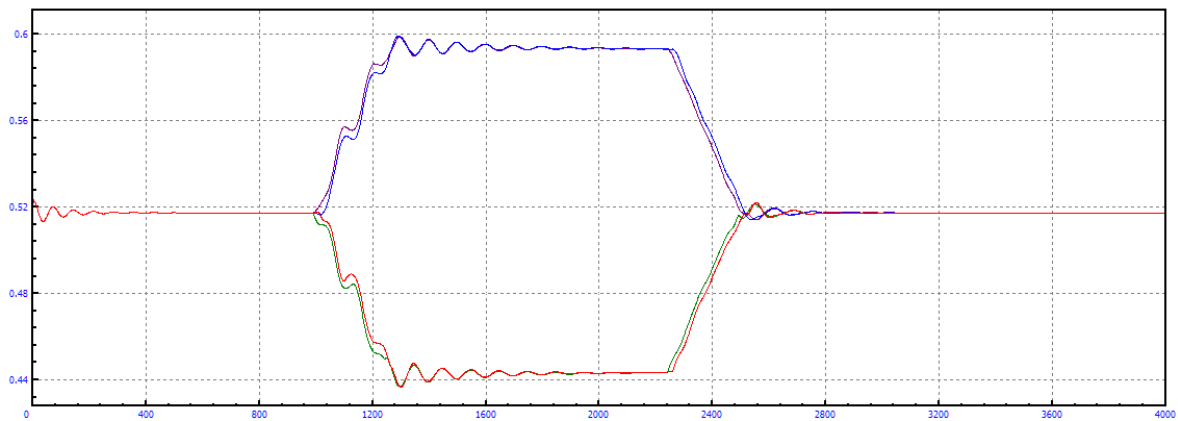


Figura A.105: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=60\text{m/s}$

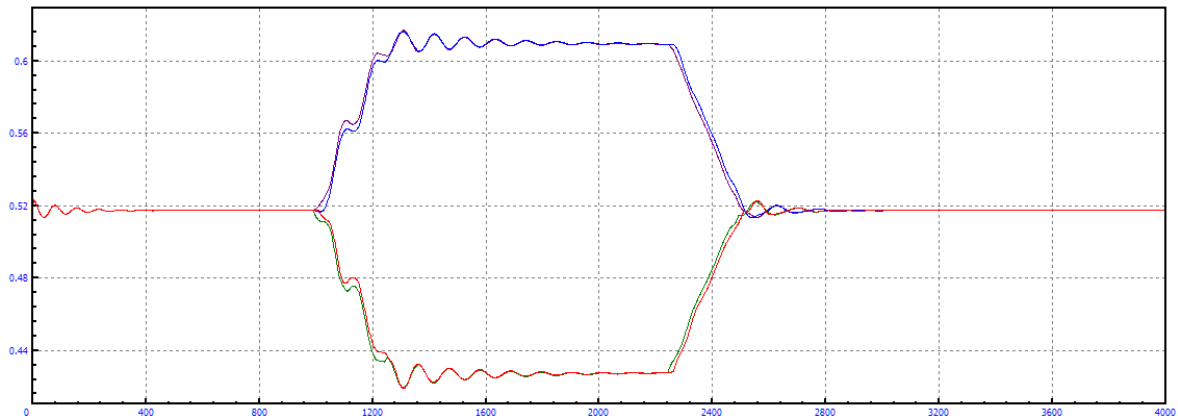


Figura A.106: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=65\text{m/s}$

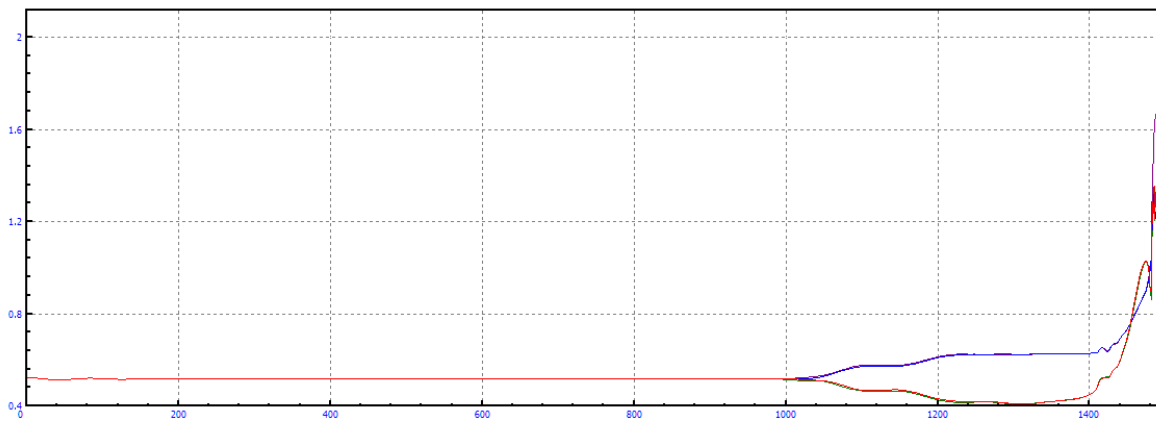


Figura A.107: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=70\text{m/s}$

B.1.4 MODIFICACIÓN=-20%

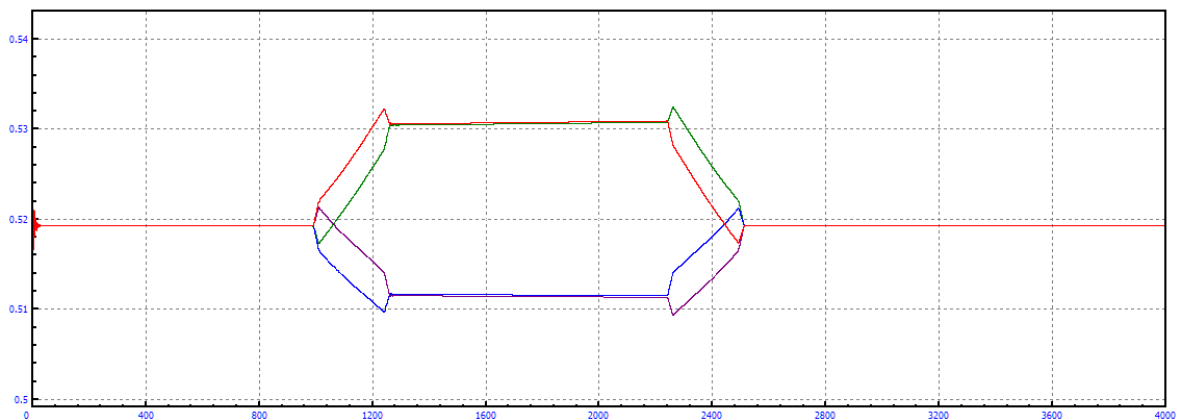


Figura A.108: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=5\text{m/s}$

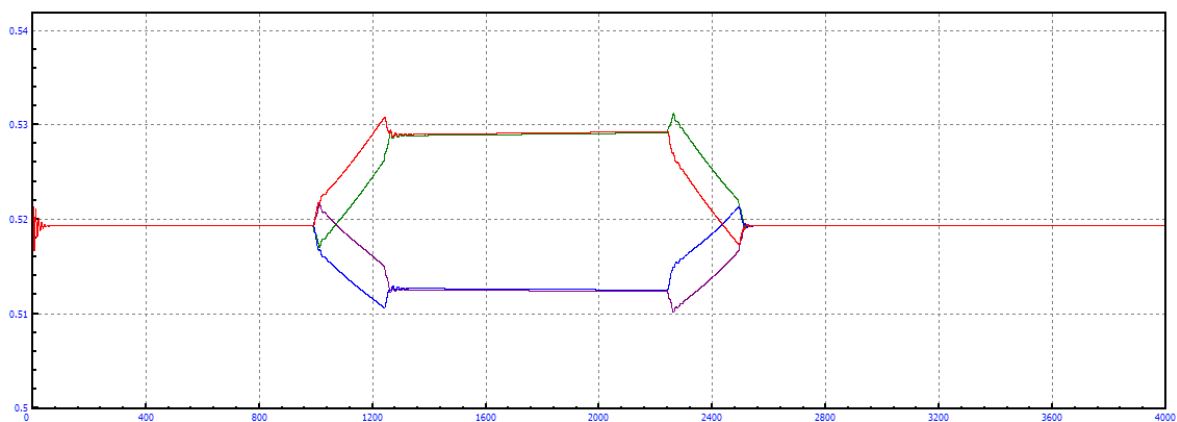


Figura A.109: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=10\text{m/s}$

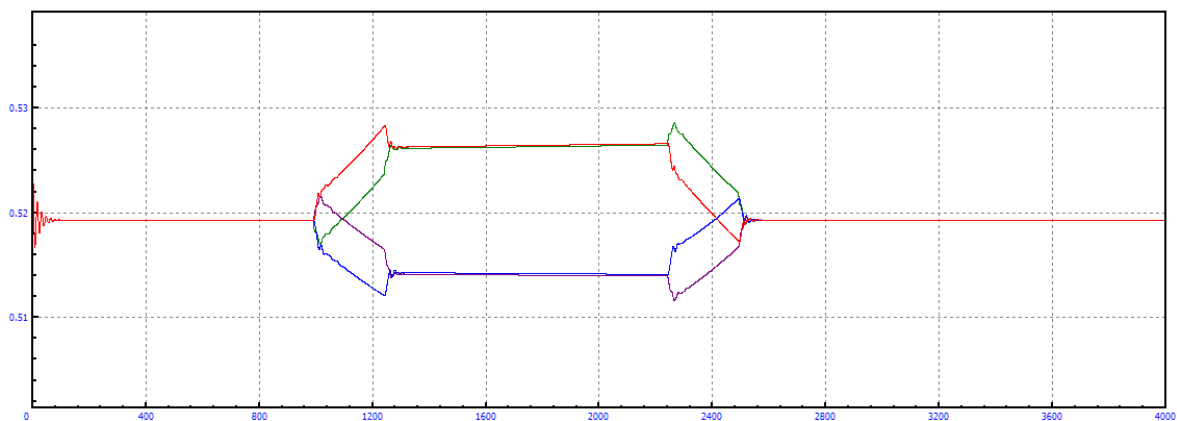


Figura A.110: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=15\text{m/s}$

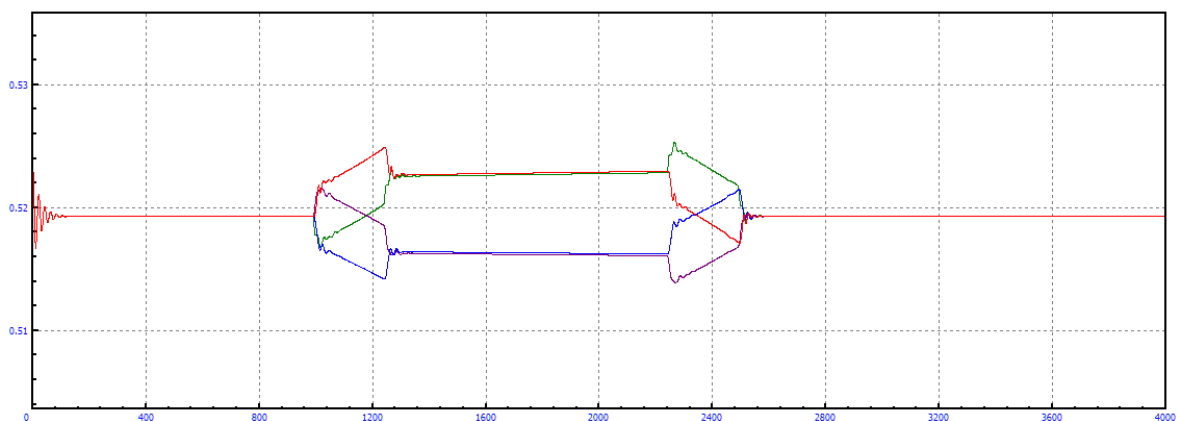


Figura A.111: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=20\text{m/s}$

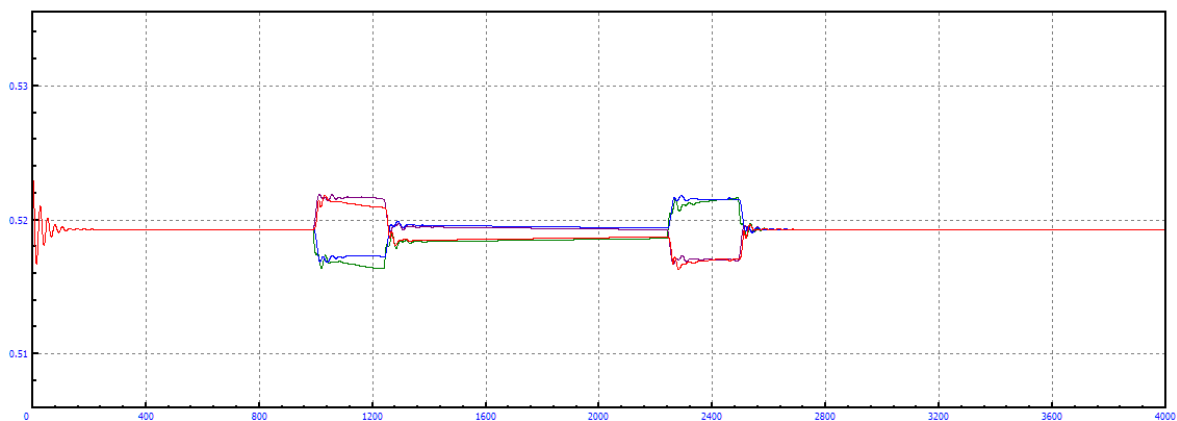


Figura A.112: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=25\text{m/s}$

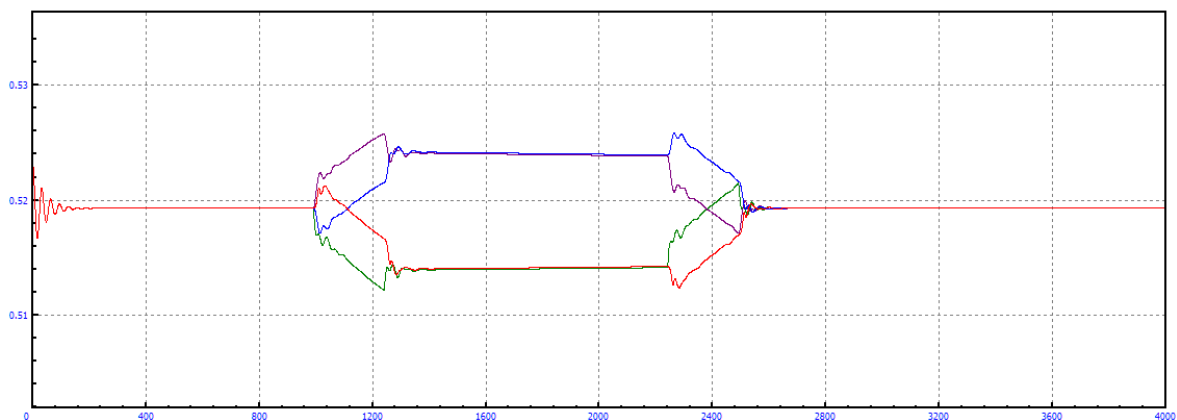


Figura A.113: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=30\text{m/s}$

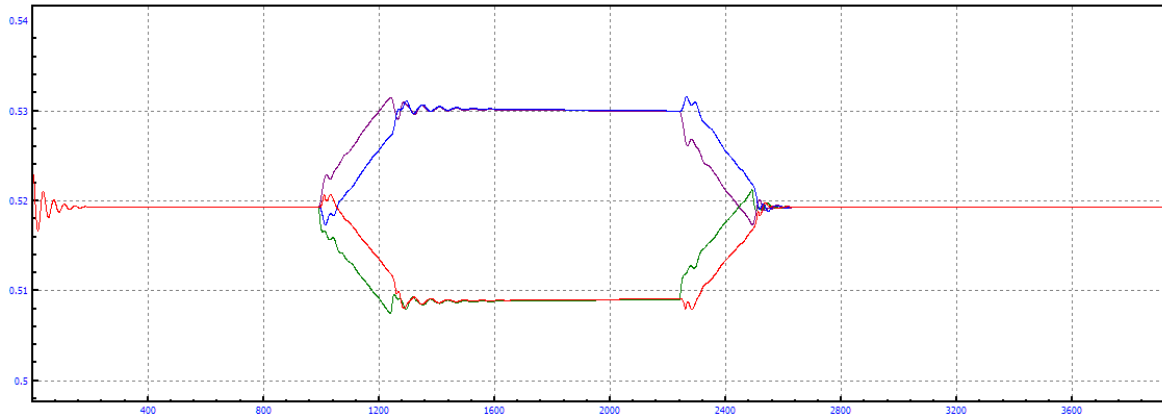


Figura A.114: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=35\text{m/s}$

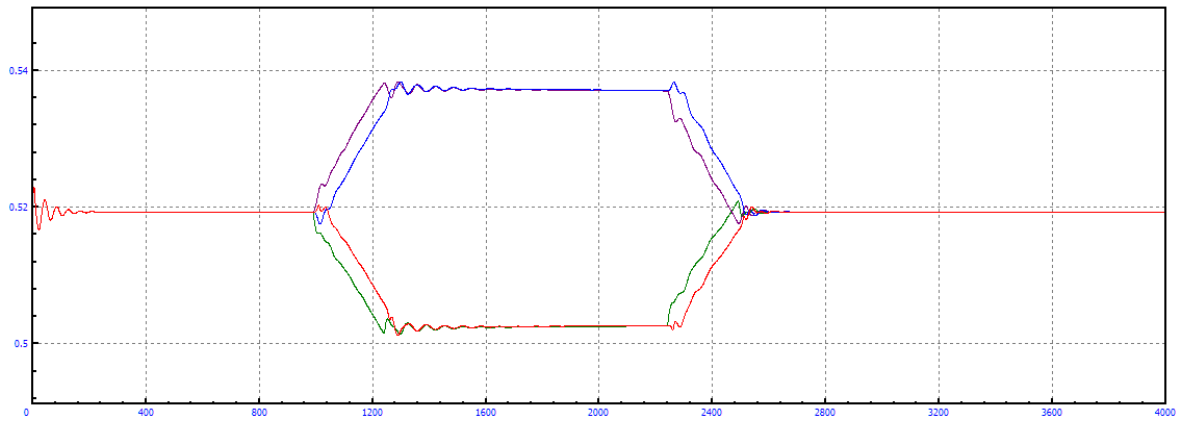


Figura A.115: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=40\text{m/s}$

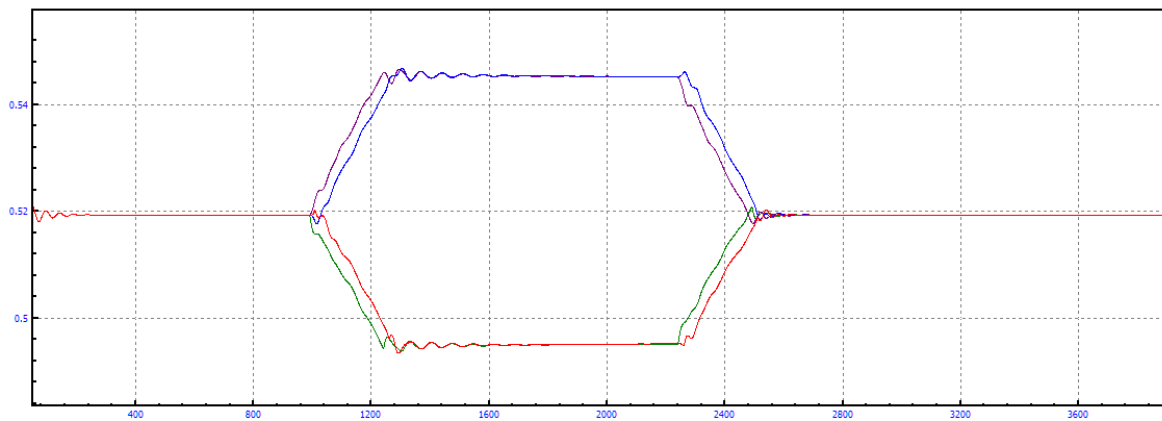


Figura A.116: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=45\text{m/s}$

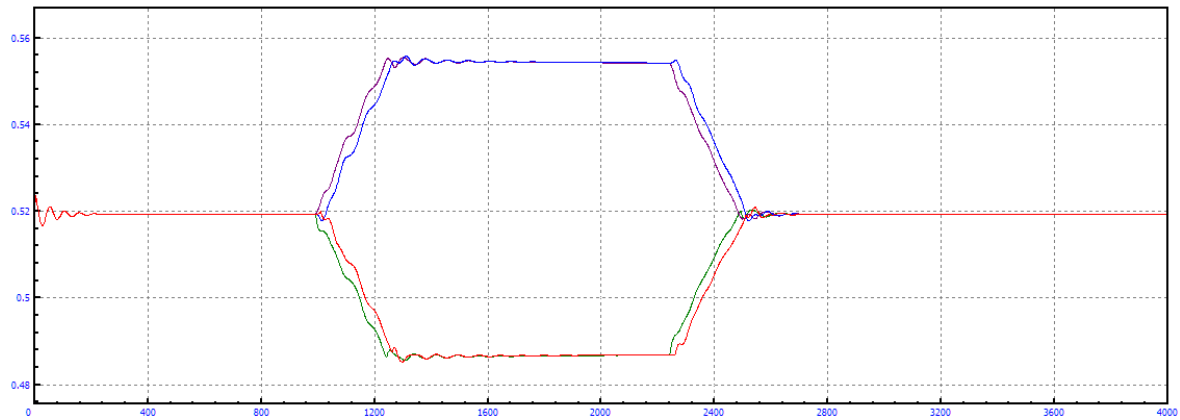


Figura A.117: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=50\text{m/s}$

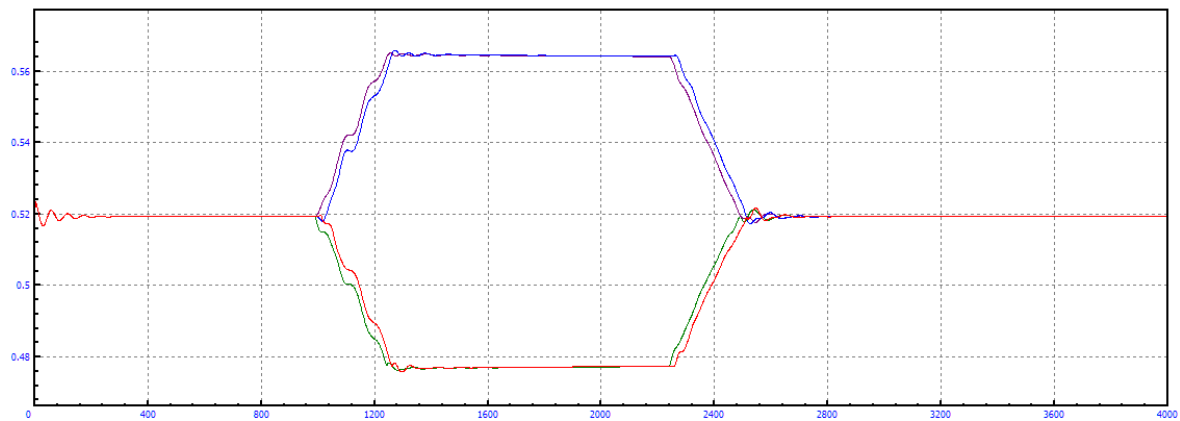


Figura A.118: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=55\text{m/s}$

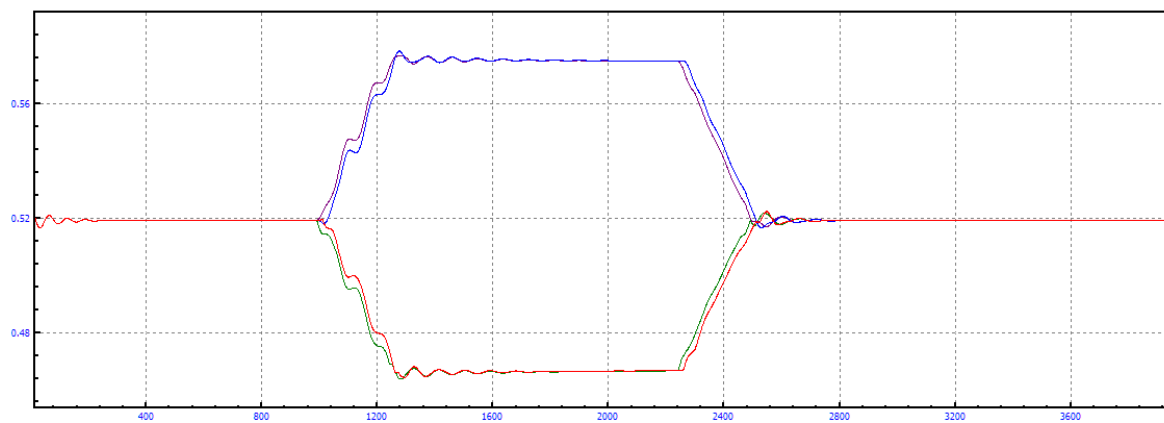


Figura A.119: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=60\text{m/s}$

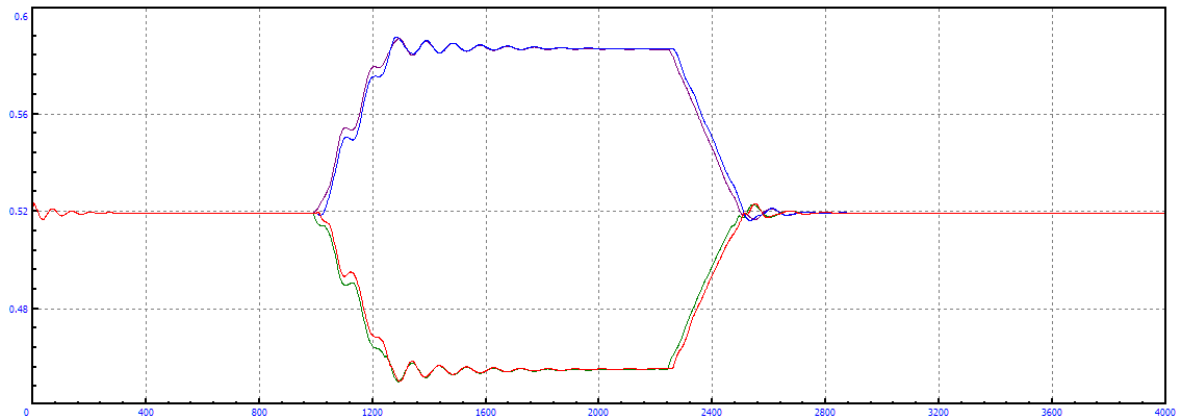


Figura A.120: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=65\text{m/s}$

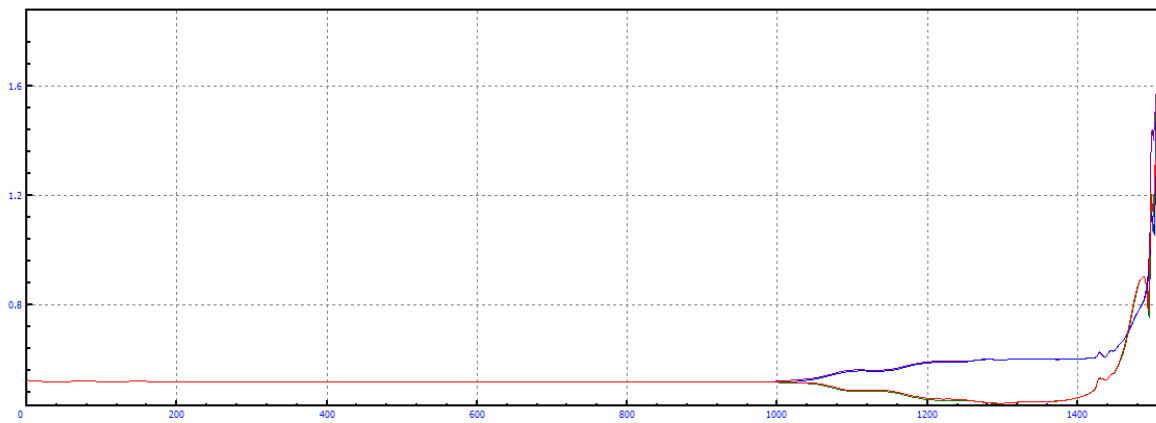


Figura A.121: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=70\text{m/s}$

B.1.5 MODIFICACIÓN= 0% (POR DEFECTO)

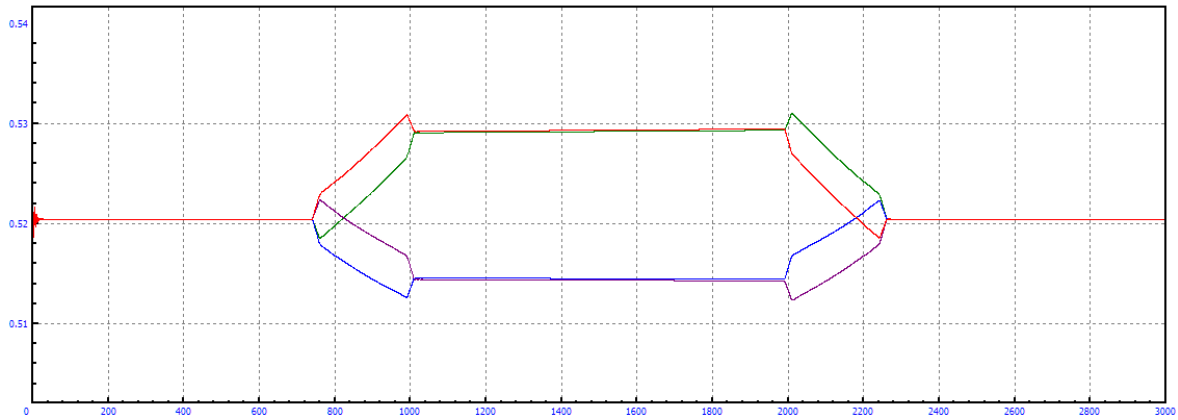


Figura A.122: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=5\text{m/s}$

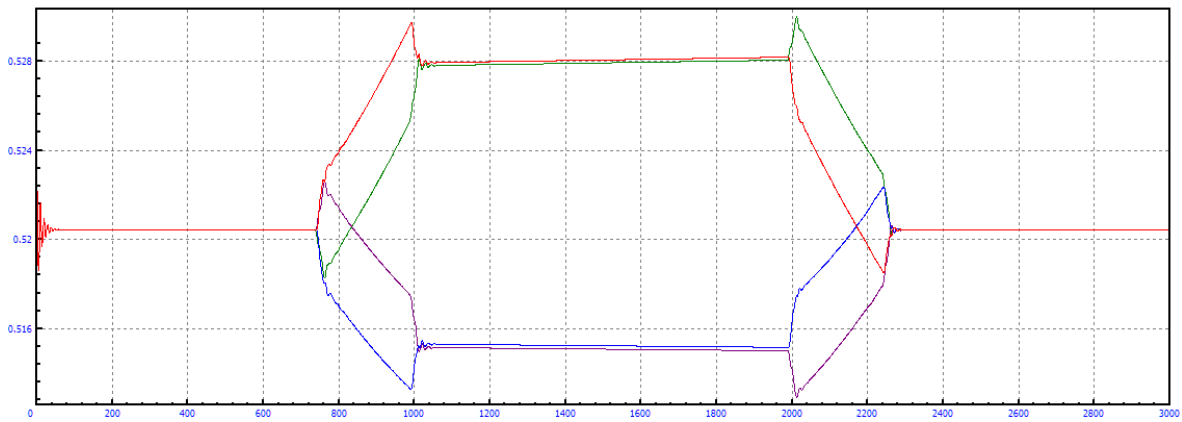


Figura A.123: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=10\text{m/s}$

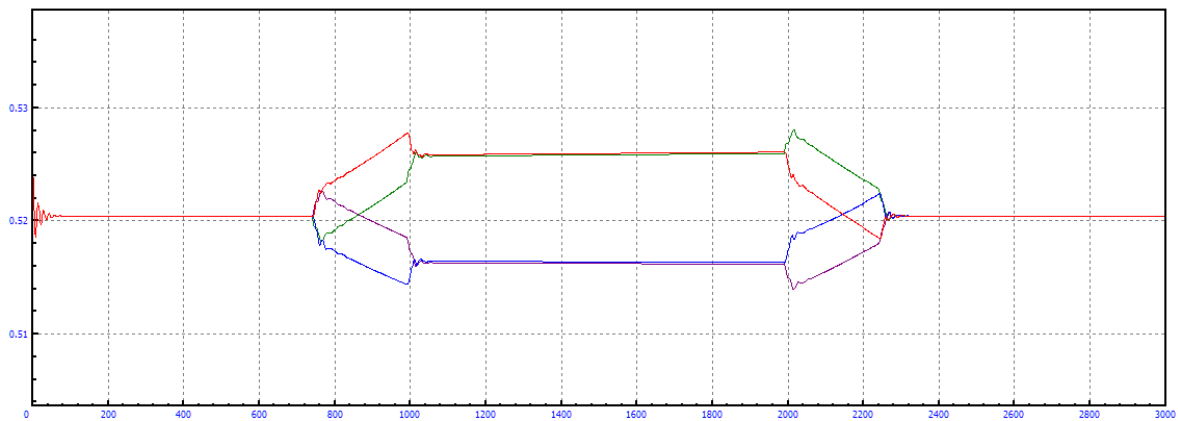


Figura A.124: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=15\text{m/s}$

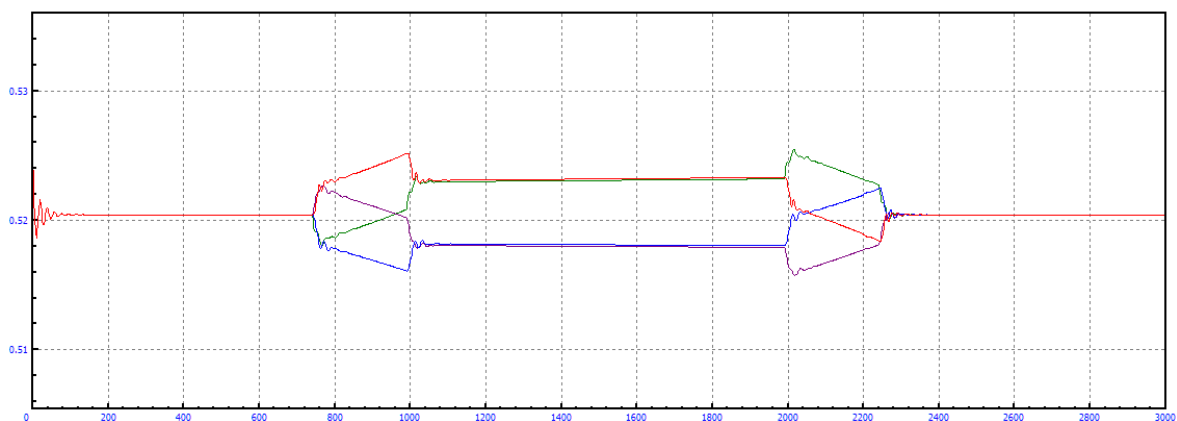


Figura A.125: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=20\text{m/s}$

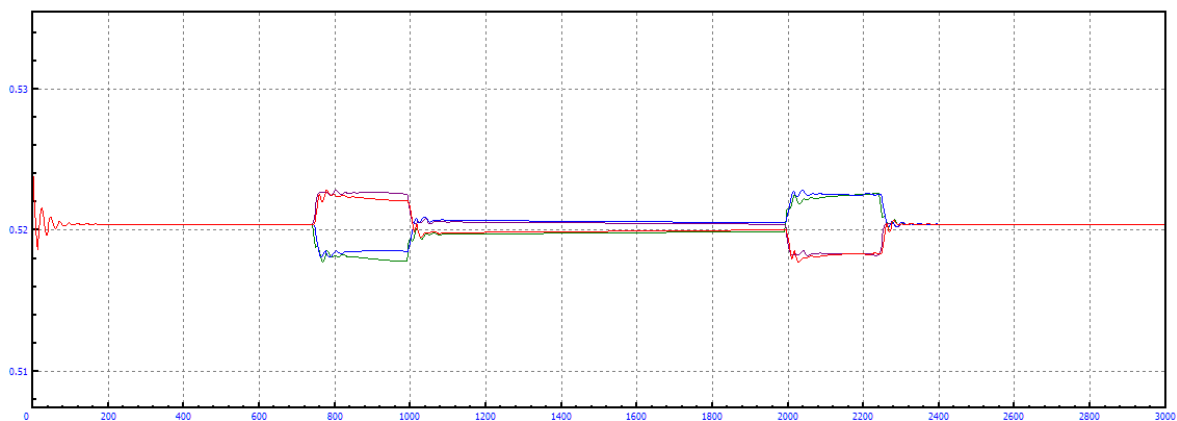


Figura A.126: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=25\text{m/s}$

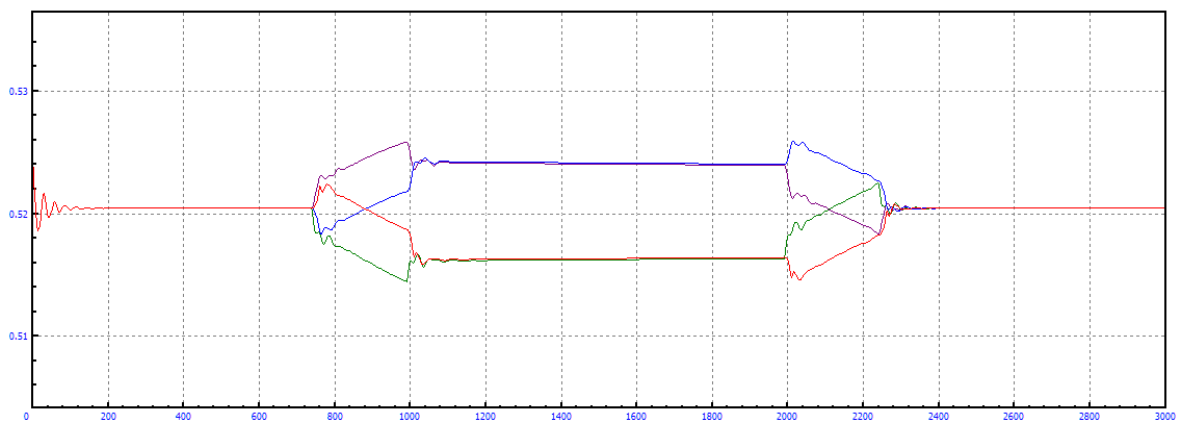


Figura A.127: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=30\text{m/s}$

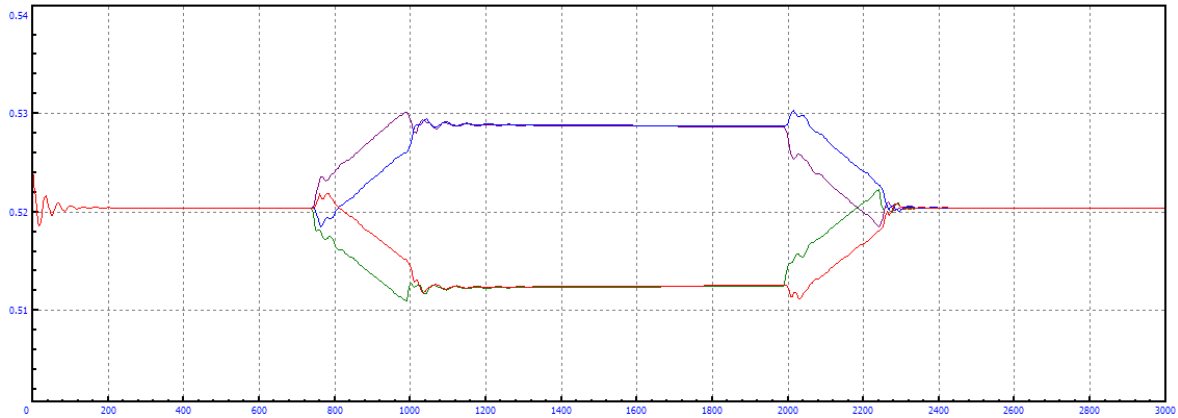


Figura A.128: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) 1km y $V=35\text{m/s}$

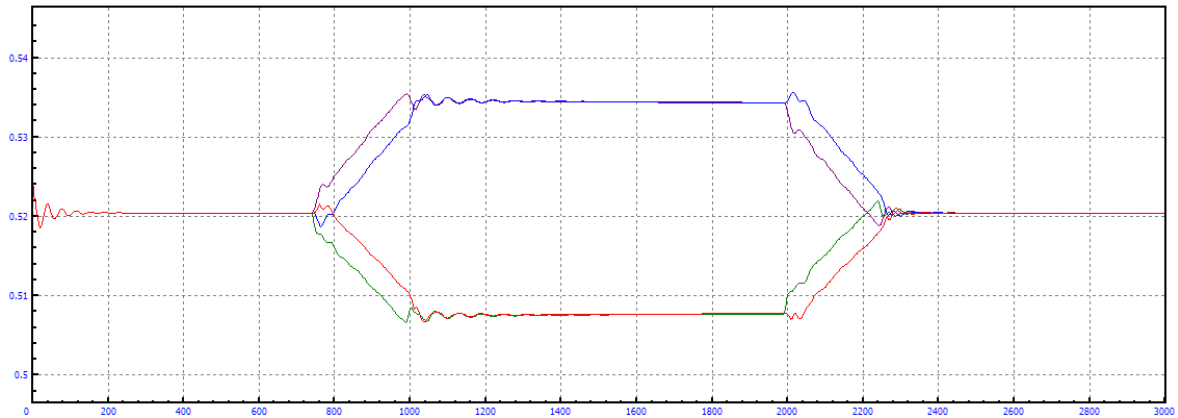


Figura A.129: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=40\text{m/s}$

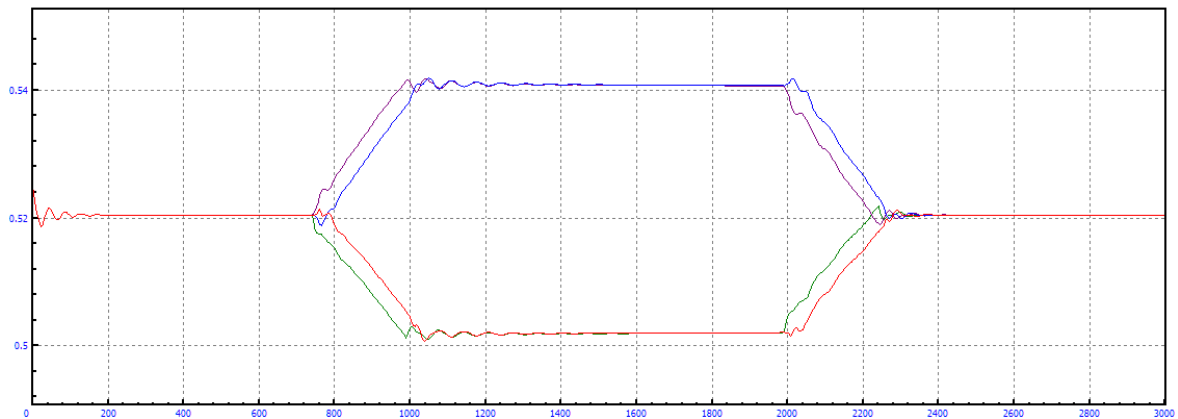


Figura A.130: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=45\text{m/s}$

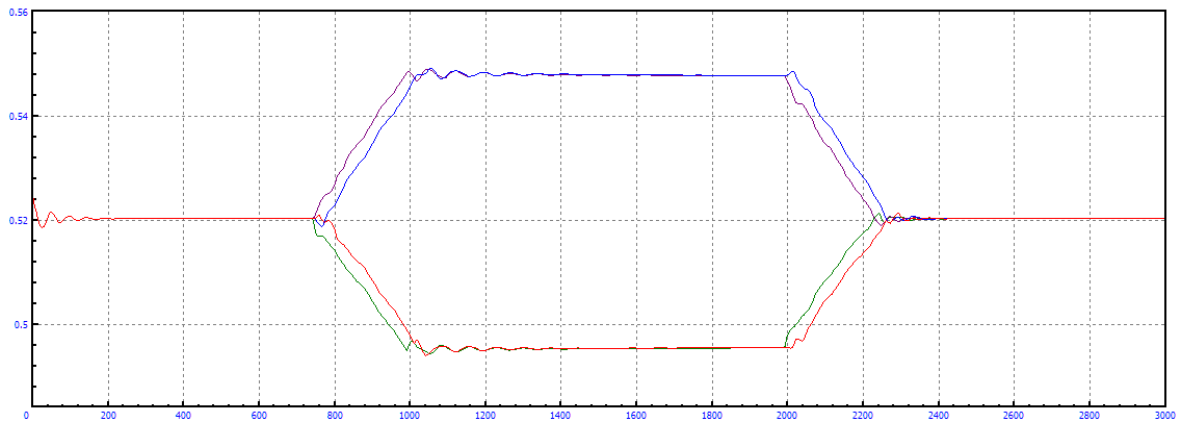


Figura A.131: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=50\text{m/s}$

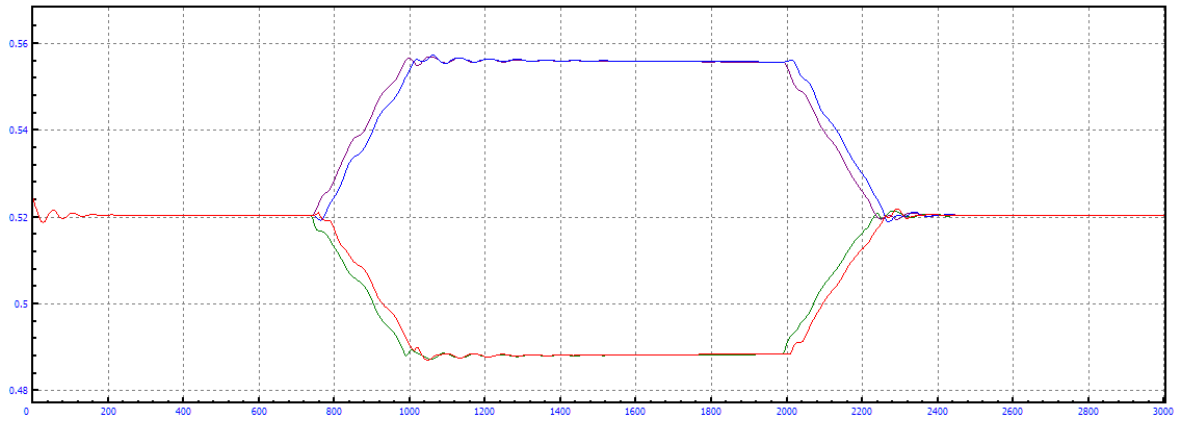


Figura A.132: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=55\text{m/s}$

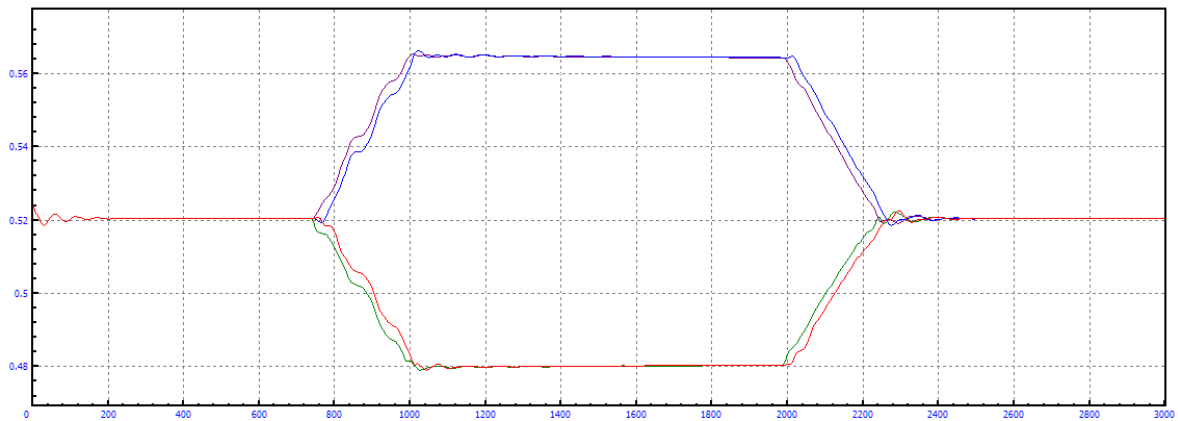


Figura A.133: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=60\text{m/s}$

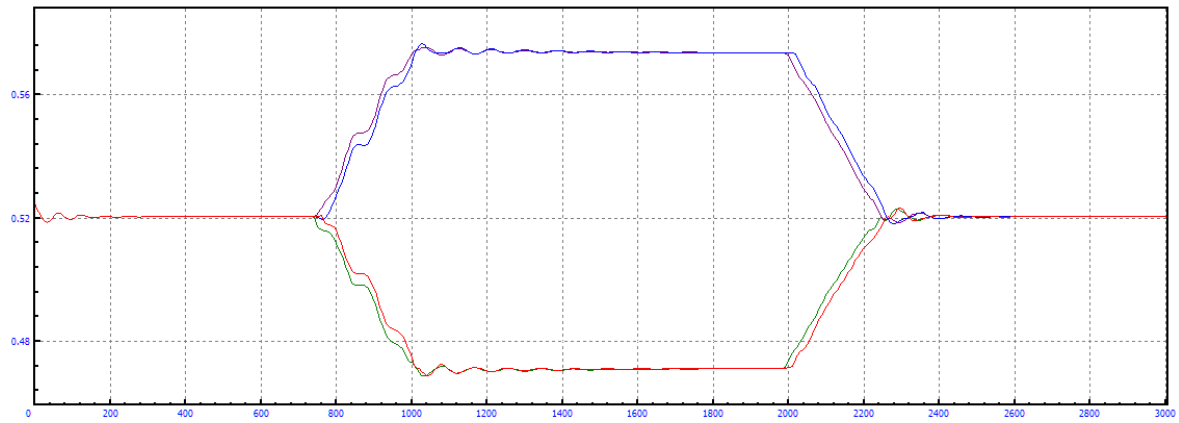


Figura A.134: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=65\text{m/s}$

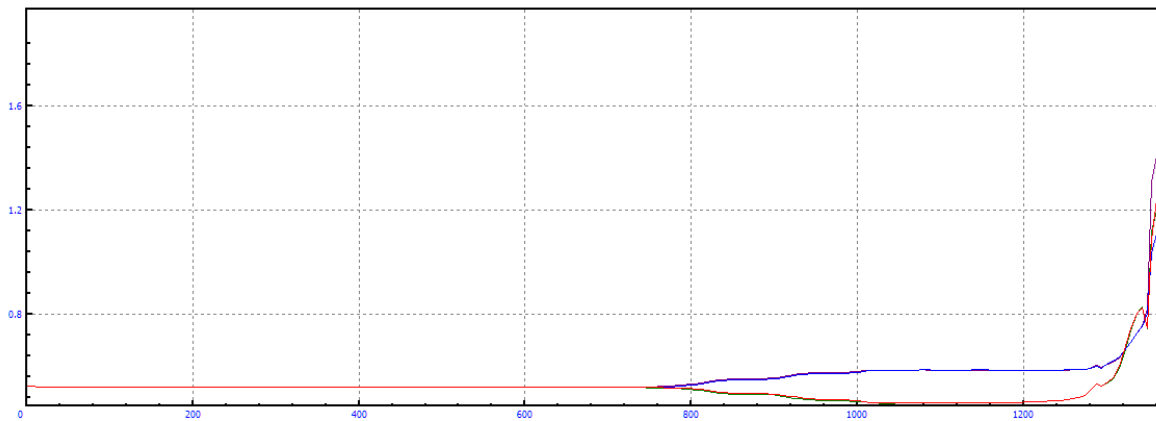


Figura A.135: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria=0% (por defecto) y $V=70\text{m/s}$

B.1.6 MODIFICACIÓN=+20%

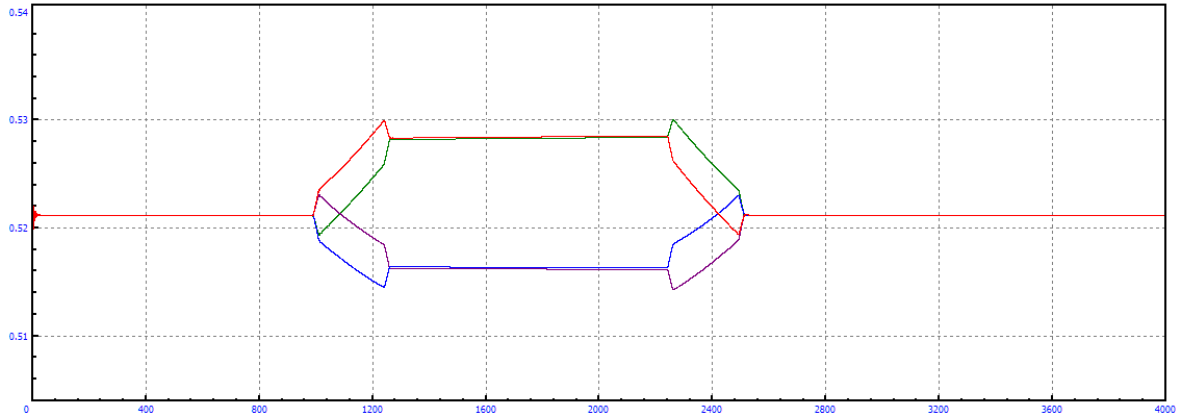


Figura A.136: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=5\text{m/s}$

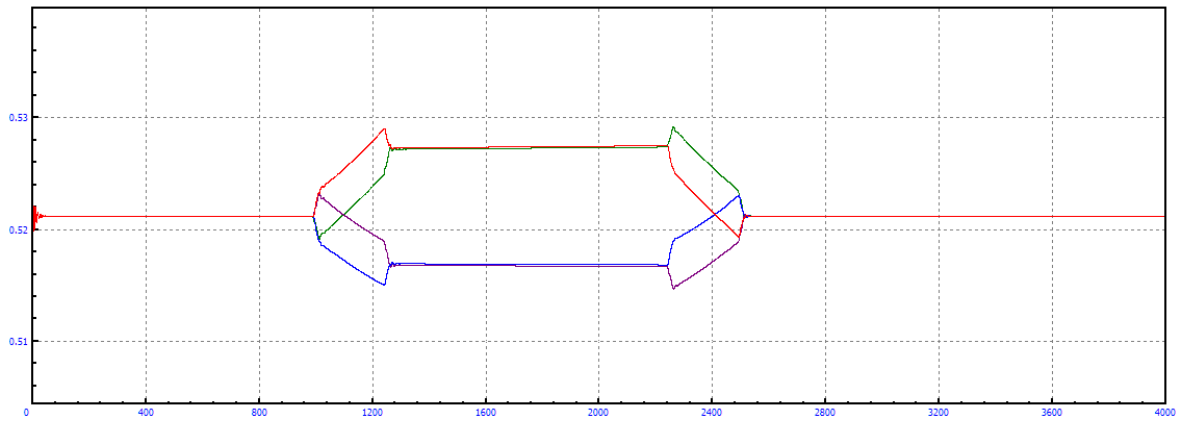


Figura A.137: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=10\text{m/s}$

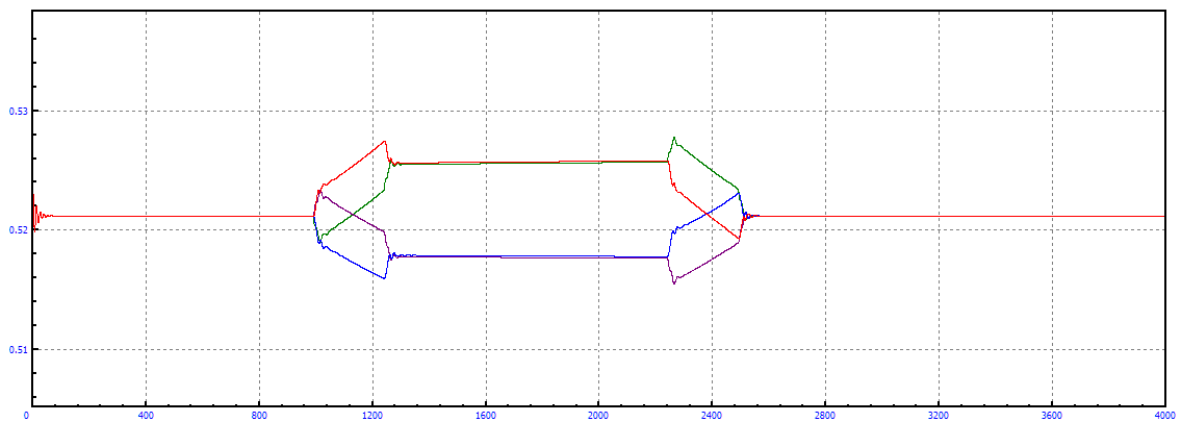


Figura A.138: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=15\text{m/s}$

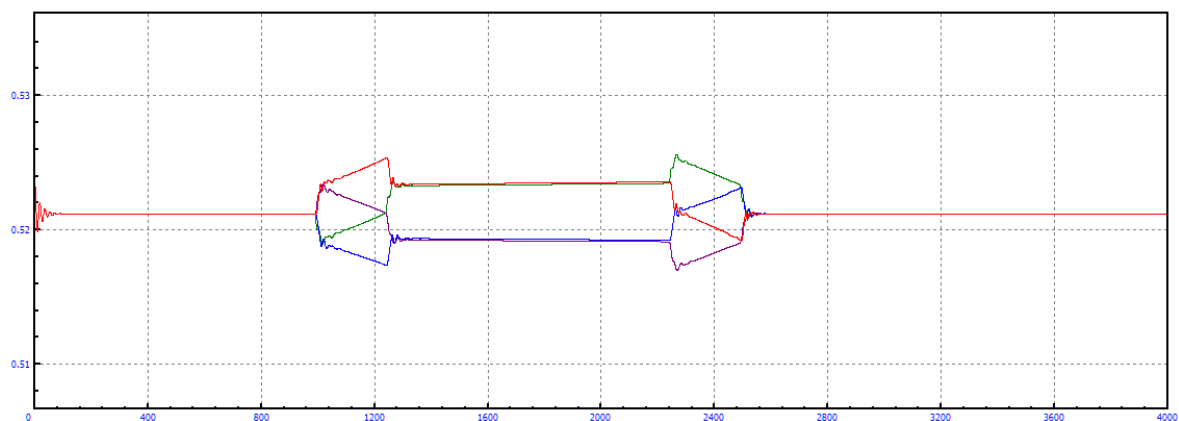


Figura A.139: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=20\text{m/s}$

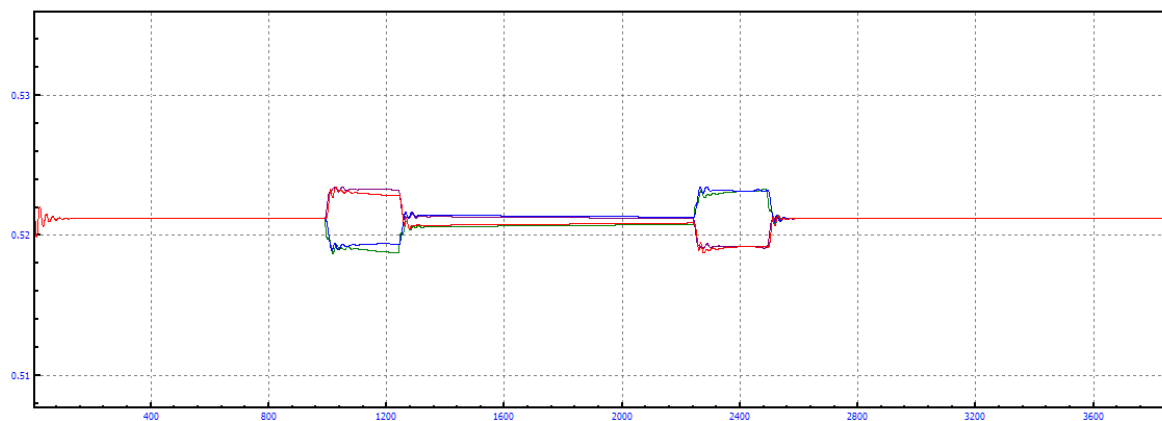


Figura A.140: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=25\text{m/s}$

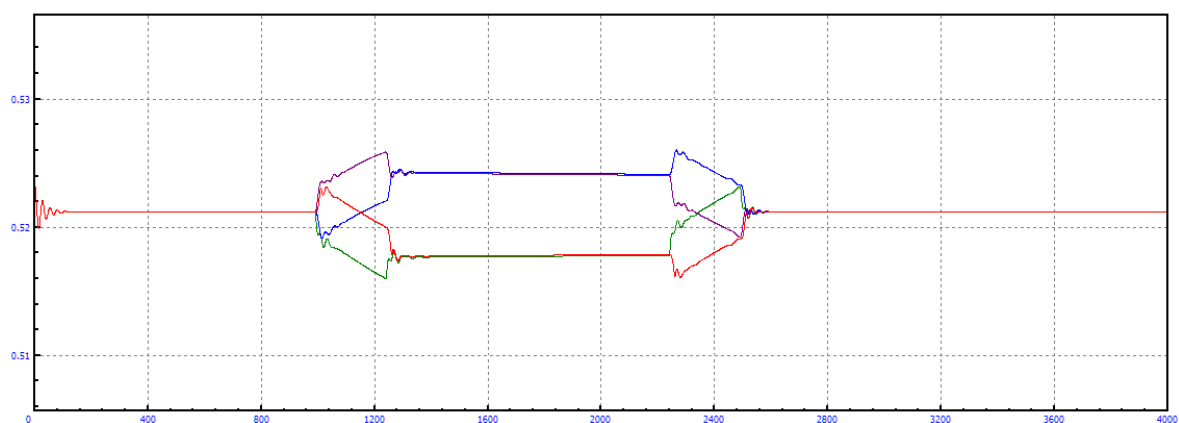


Figura A.141: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=30\text{m/s}$

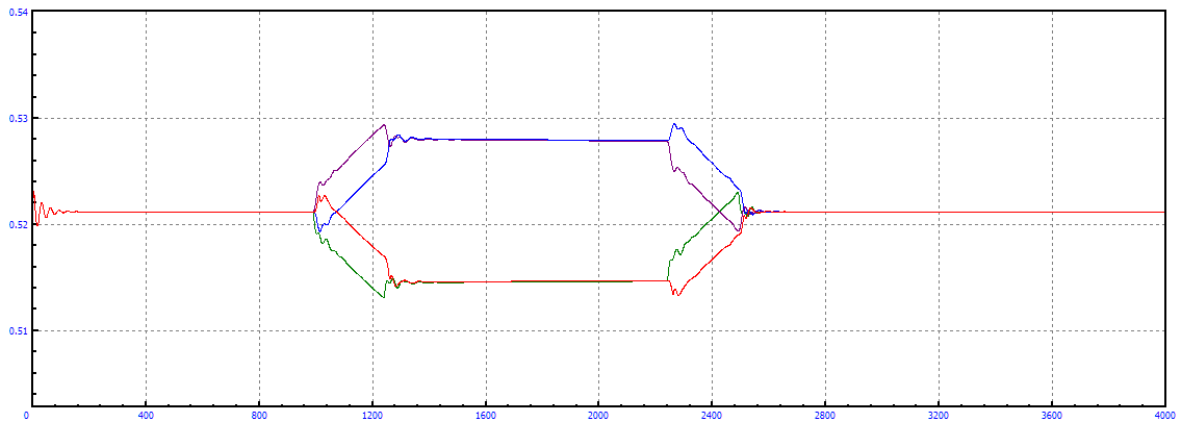


Figura A.142: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=35\text{m/s}$

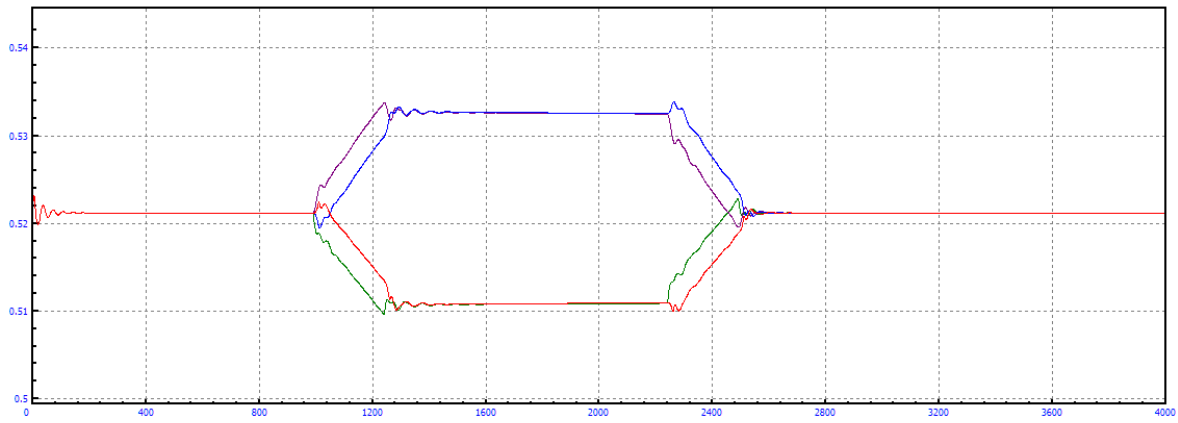


Figura A.143: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=40\text{m/s}$

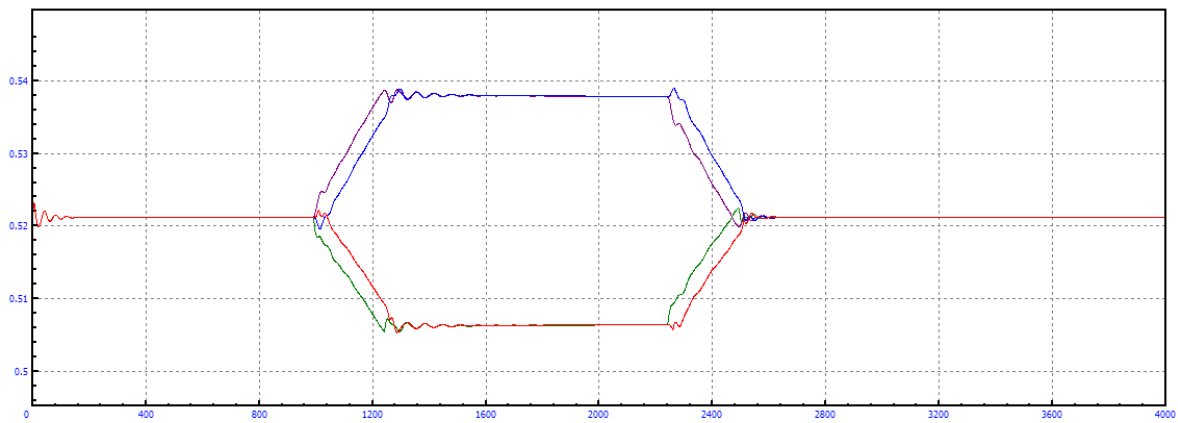


Figura A.144: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=45\text{m/s}$

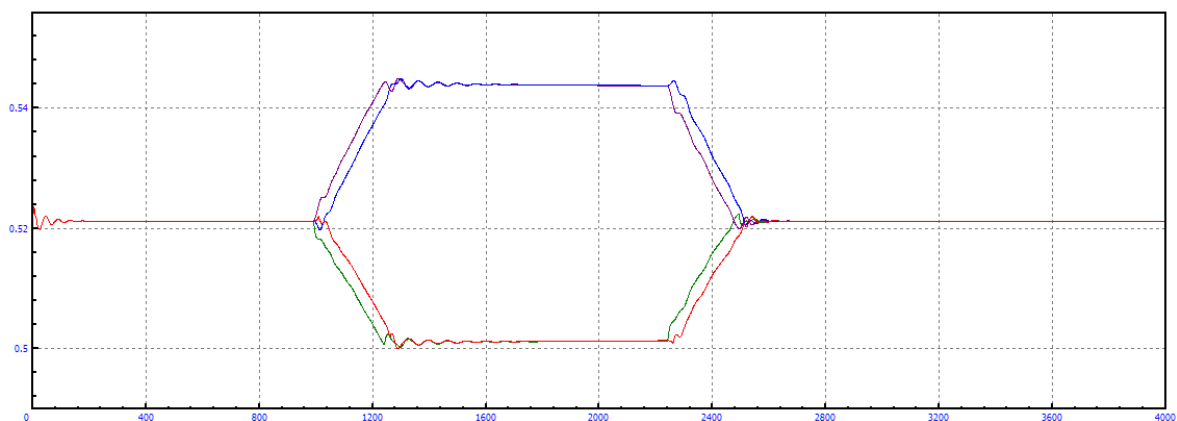


Figura A.145: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=50\text{m/s}$

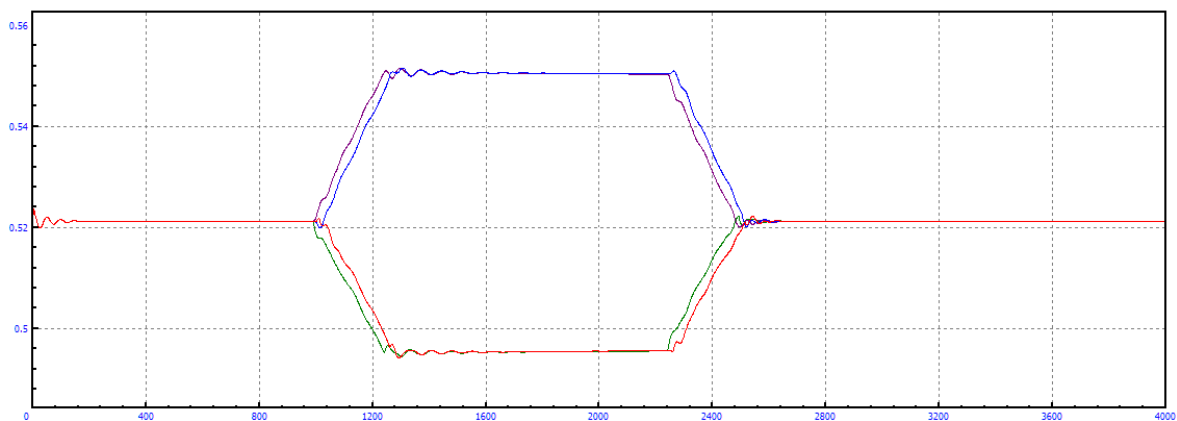


Figura A.146: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=55\text{m/s}$

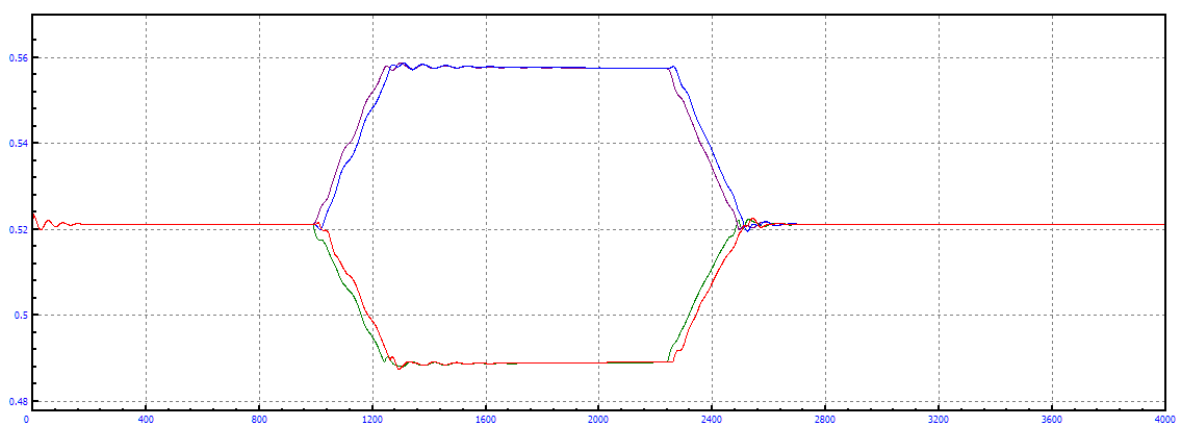


Figura A.147: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=60\text{m/s}$

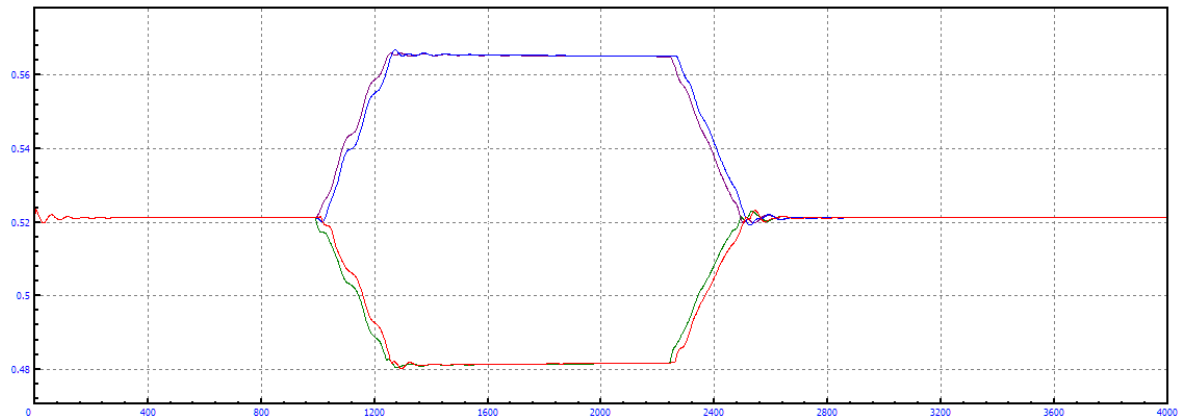


Figura A.148: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=65\text{m/s}$

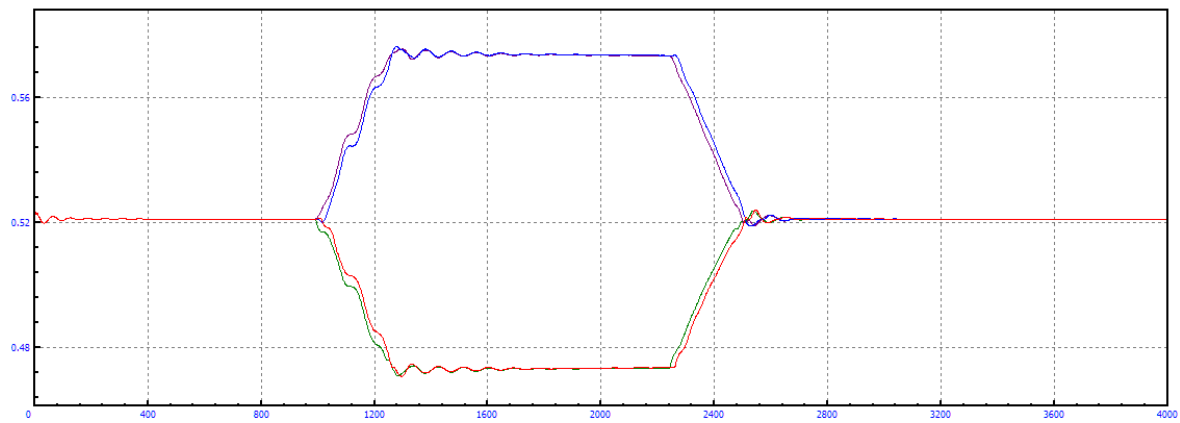


Figura A.149: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=70\text{m/s}$

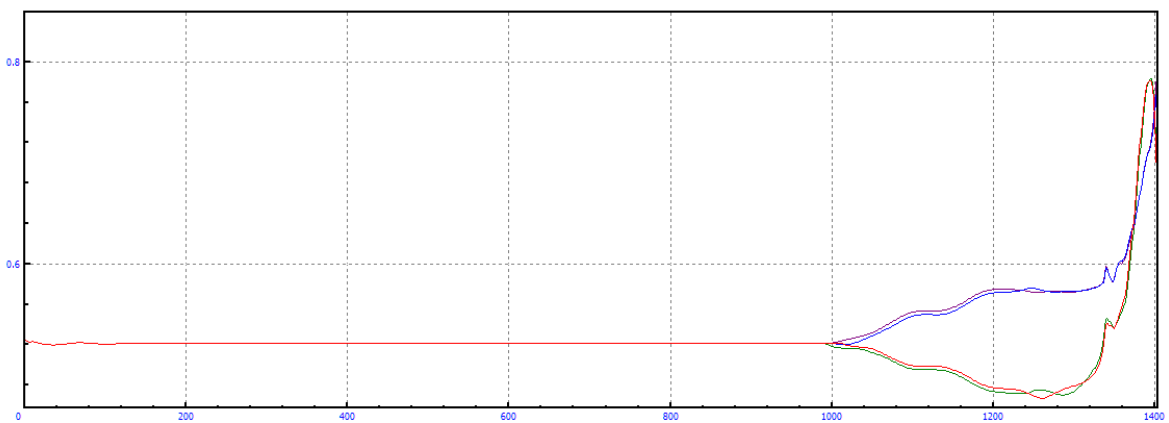


Figura A.150: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +20% y $V=75\text{m/s}$

B.1.7 MODIFICACIÓN=+40%

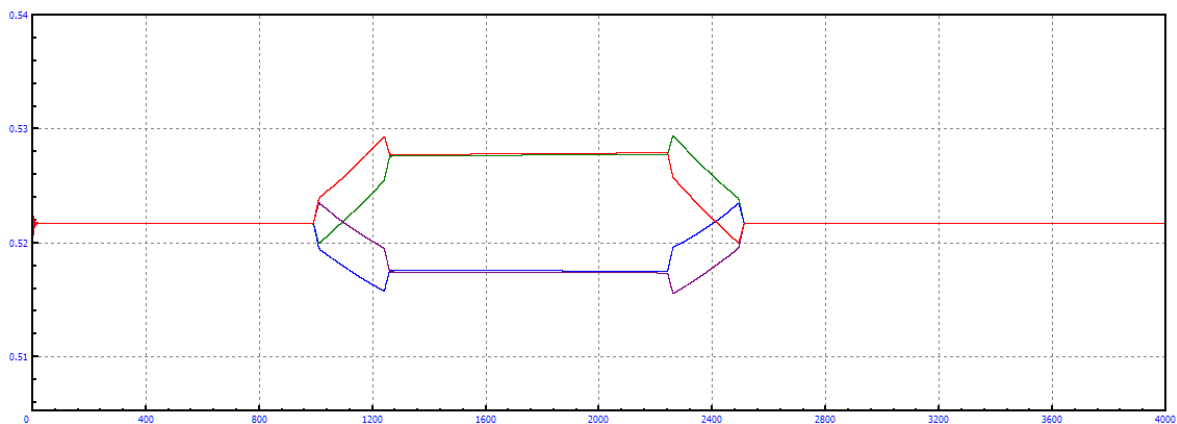


Figura A.151: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=5\text{m/s}$

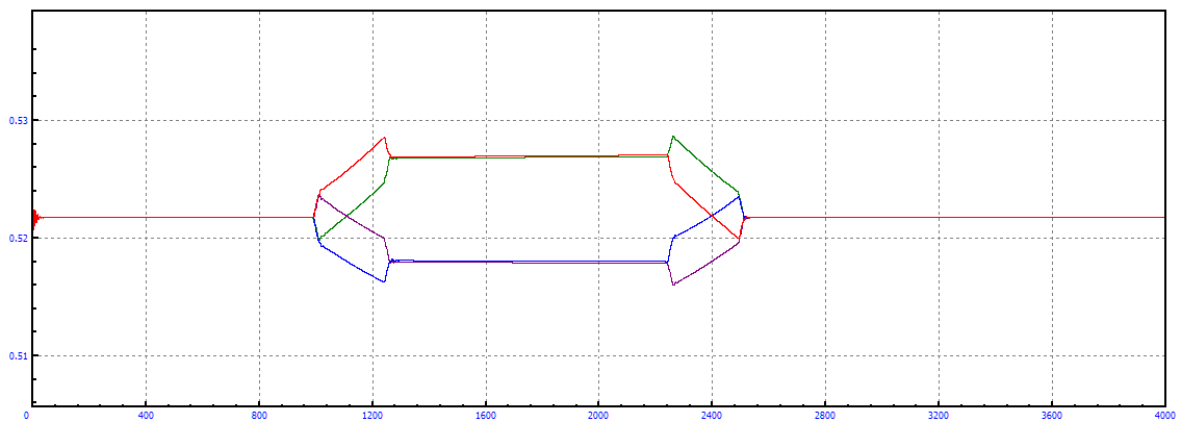


Figura A.152: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=10\text{m/s}$

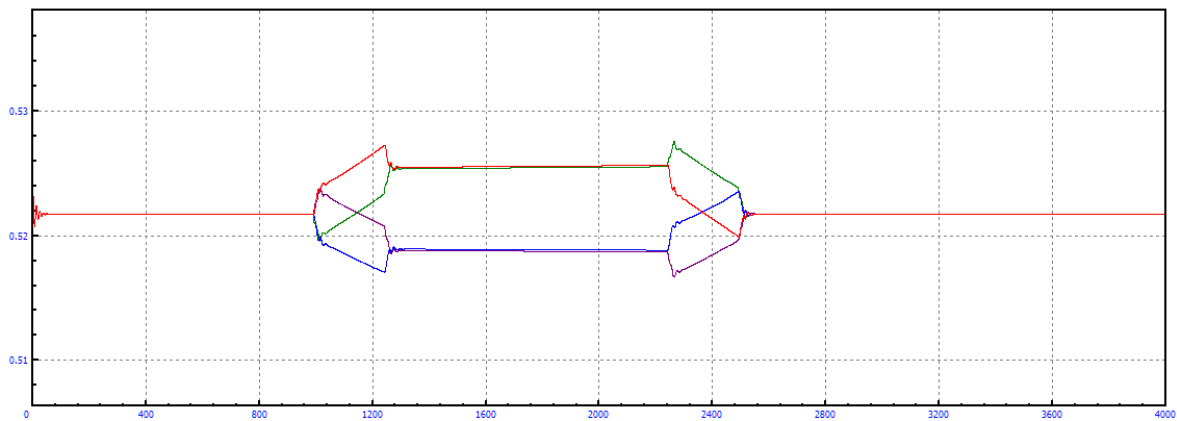


Figura A.153: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=15\text{m/s}$

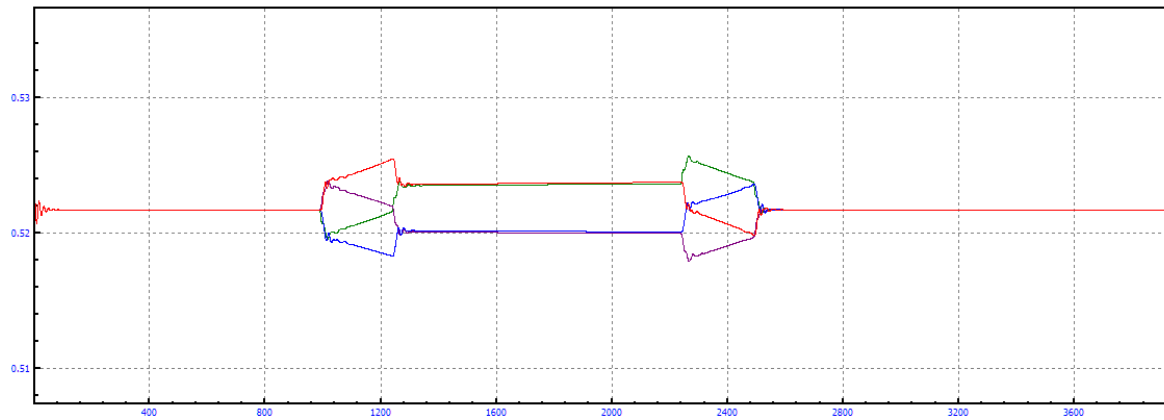


Figura A.154: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=20\text{m/s}$

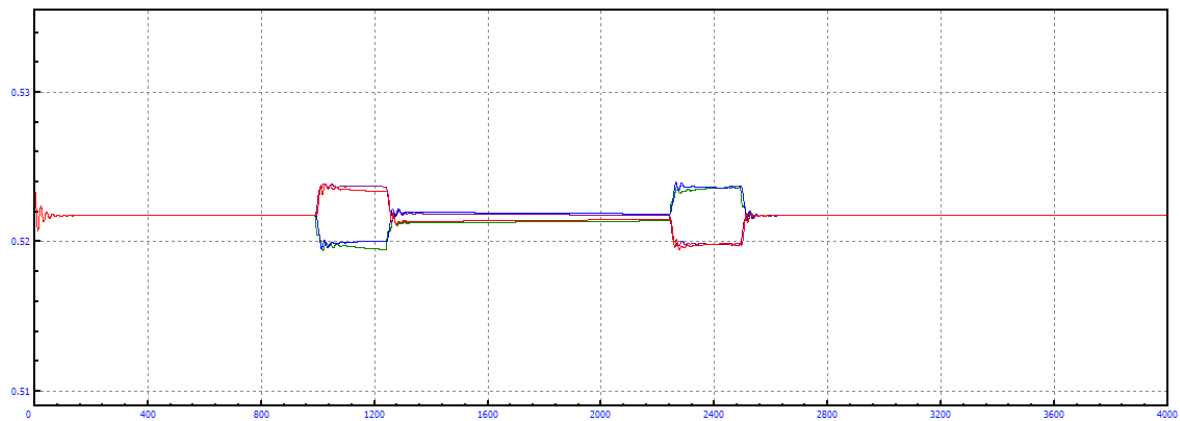


Figura A.155: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=25\text{m/s}$

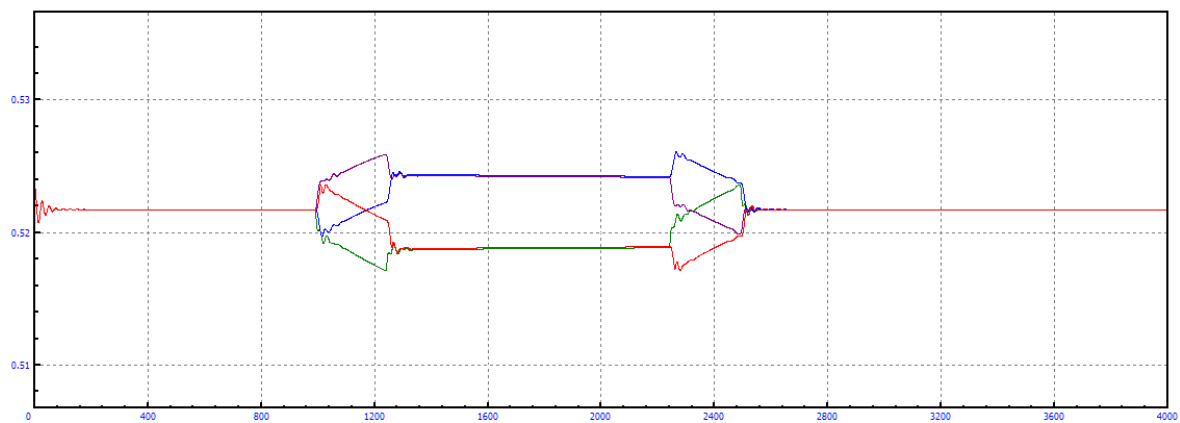


Figura A.156: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=30\text{m/s}$

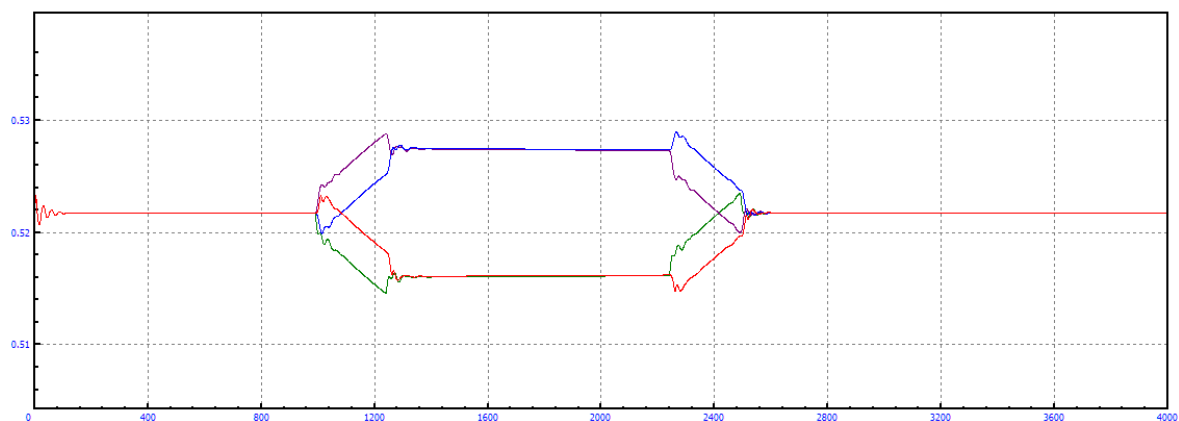


Figura A.157: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=35\text{m/s}$

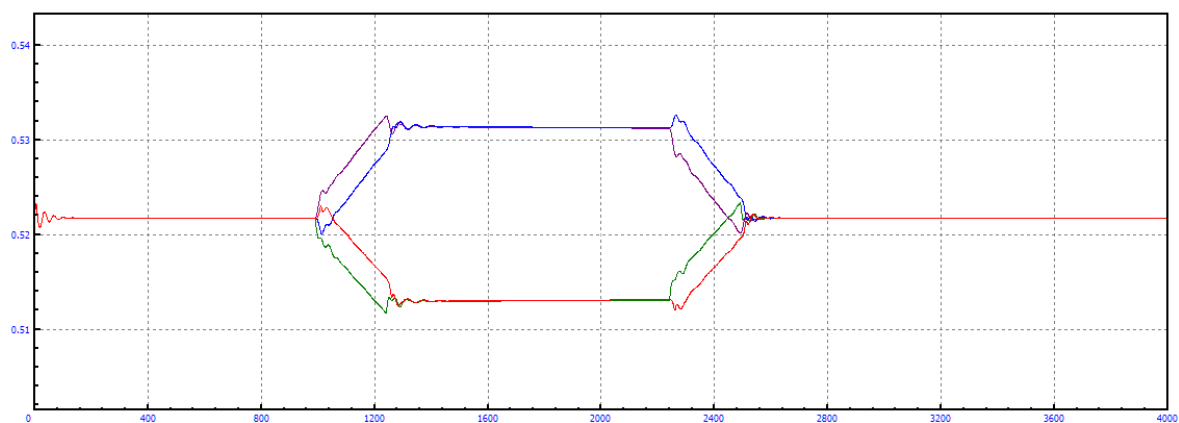


Figura A.158: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=40\text{m/s}$

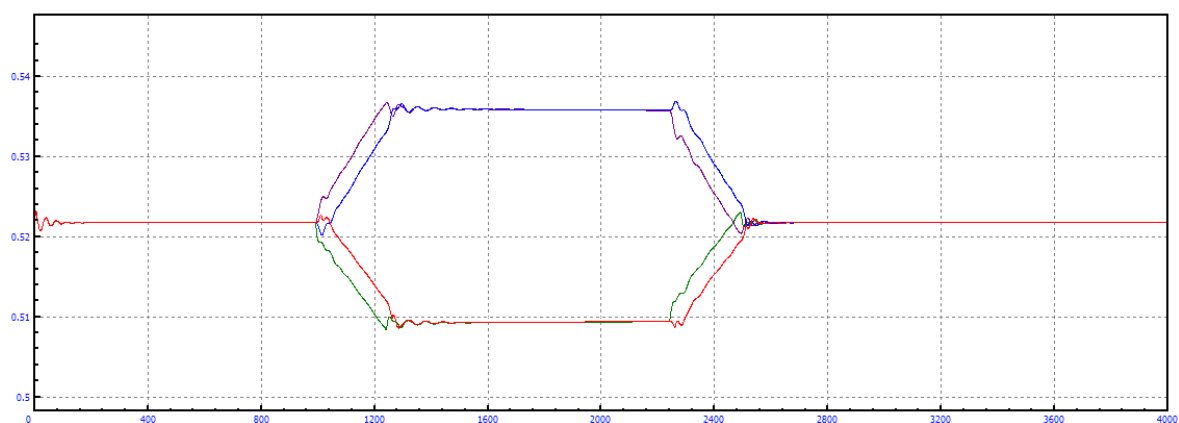


Figura A.159: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=45\text{m/s}$

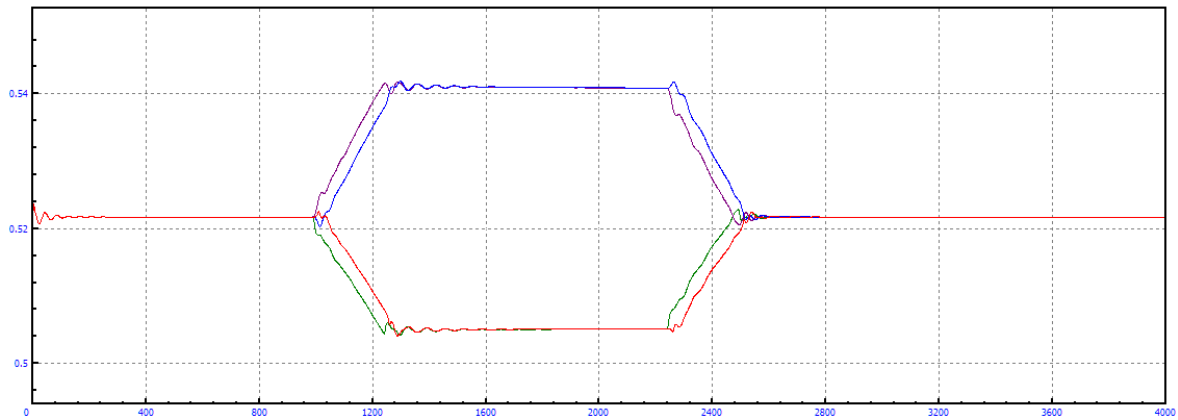


Figura A.160: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=50\text{m/s}$

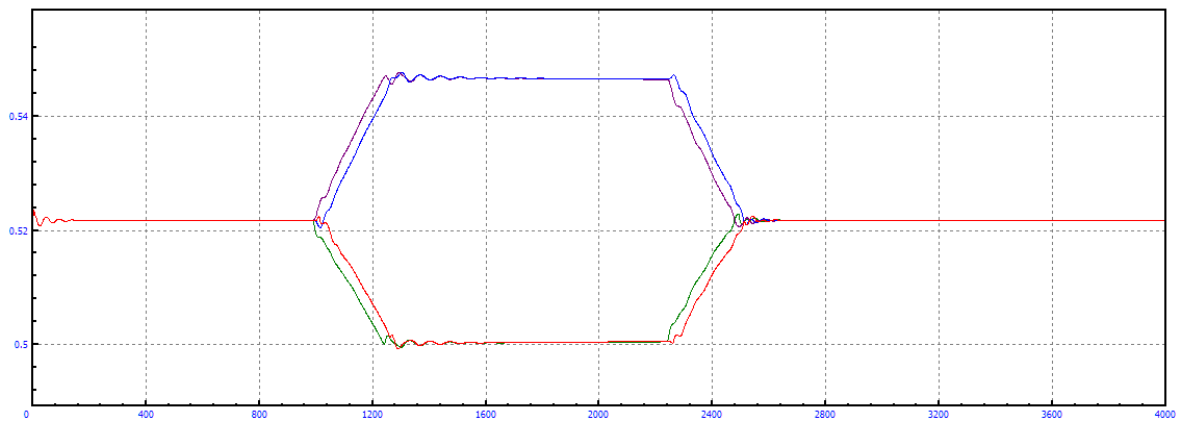


Figura A.161: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=55\text{m/s}$

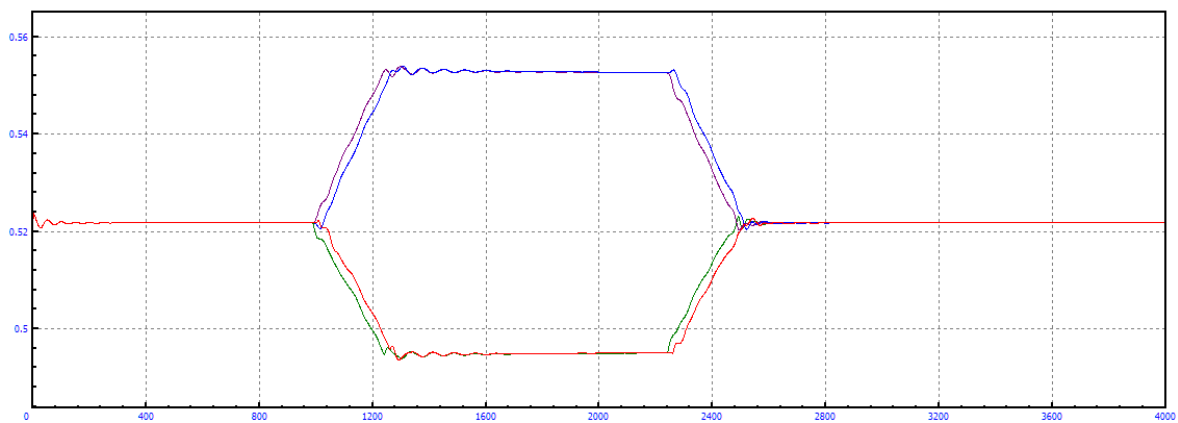


Figura A.162: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=60\text{m/s}$

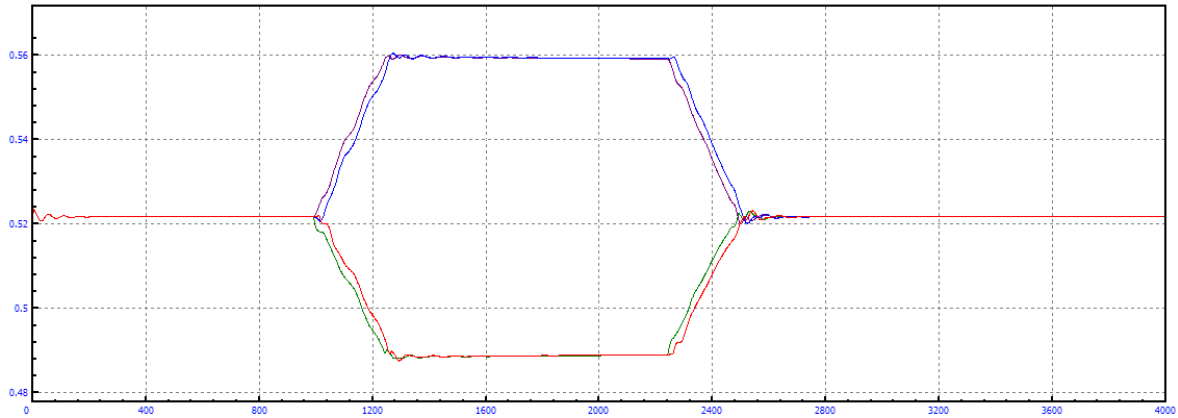


Figura A.163: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=65\text{m/s}$

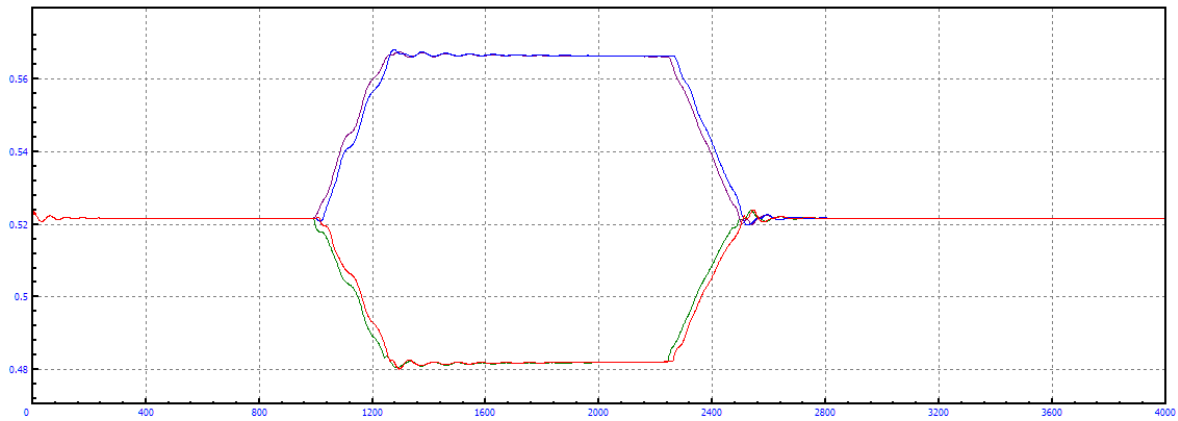


Figura A.164: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=70\text{m/s}$

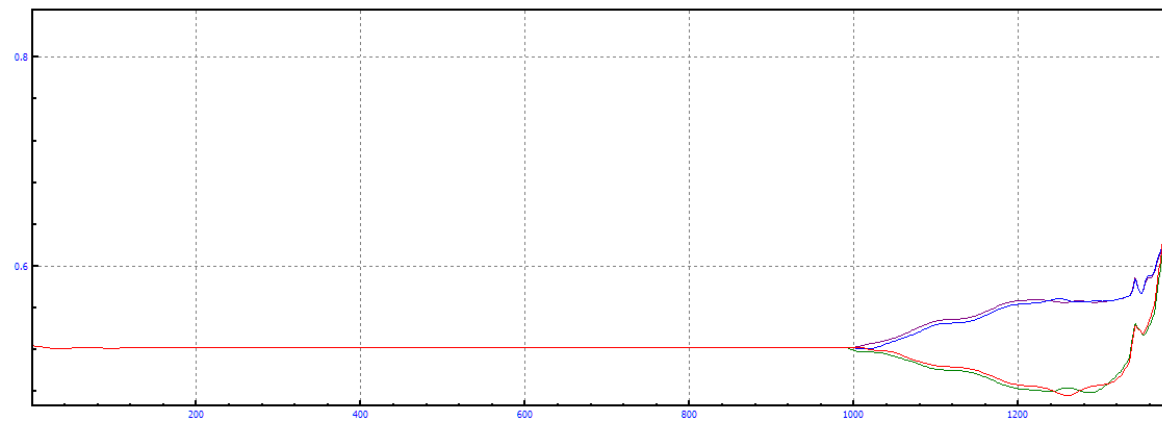


Figura A.165: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +40% y $V=75\text{m/s}$

B.1.8 MODIFICACIÓN=+60%

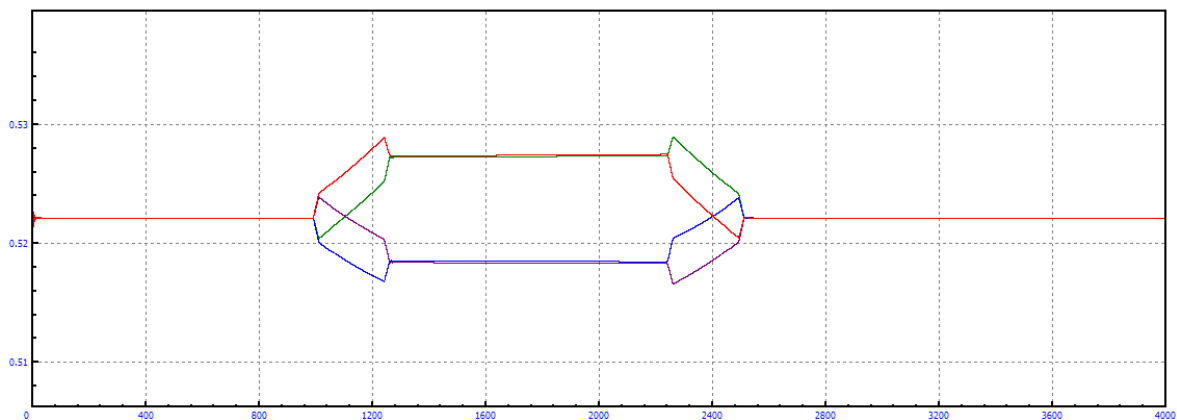


Figura A.166: Longitud amortiguadores en curva R=1km, amortiguación secundaria= +60% y V=5m/s

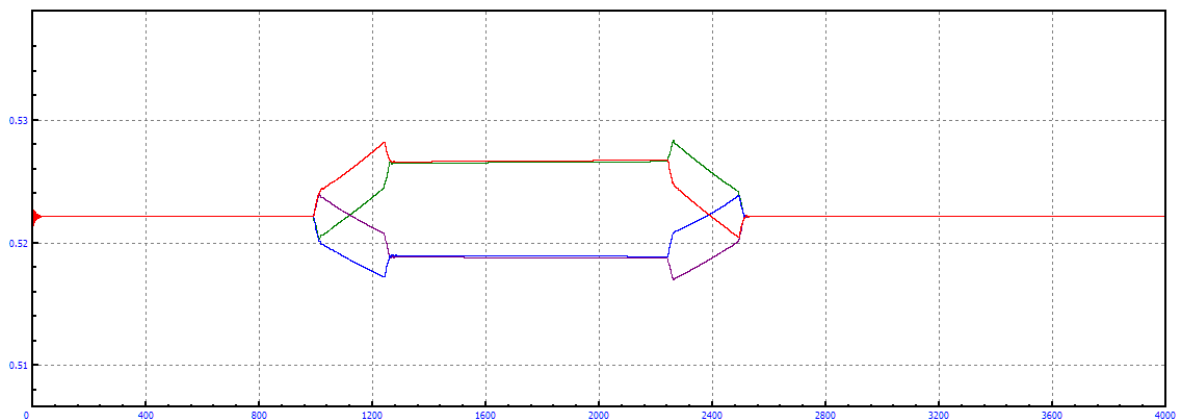


Figura A.167: Longitud amortiguadores en curva R=1km, amortiguación secundaria= +60% y V=10m/s

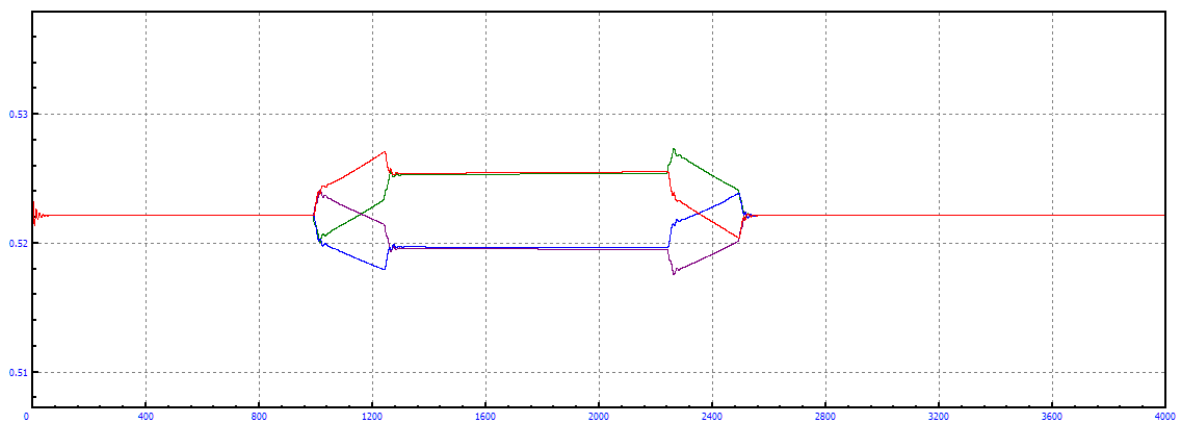


Figura A.168: Longitud amortiguadores en curva R=1km, amortiguación secundaria= +60% y V=15m/s

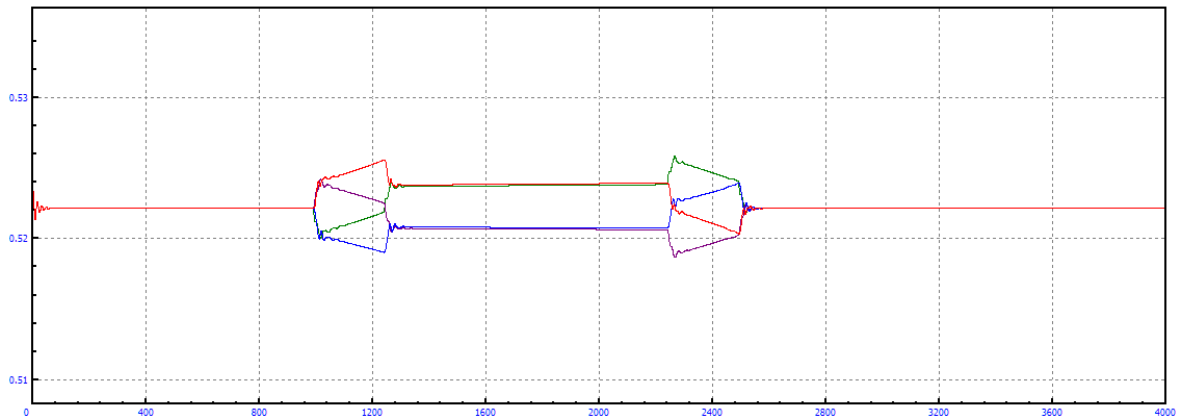


Figura A.169: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=20\text{m/s}$

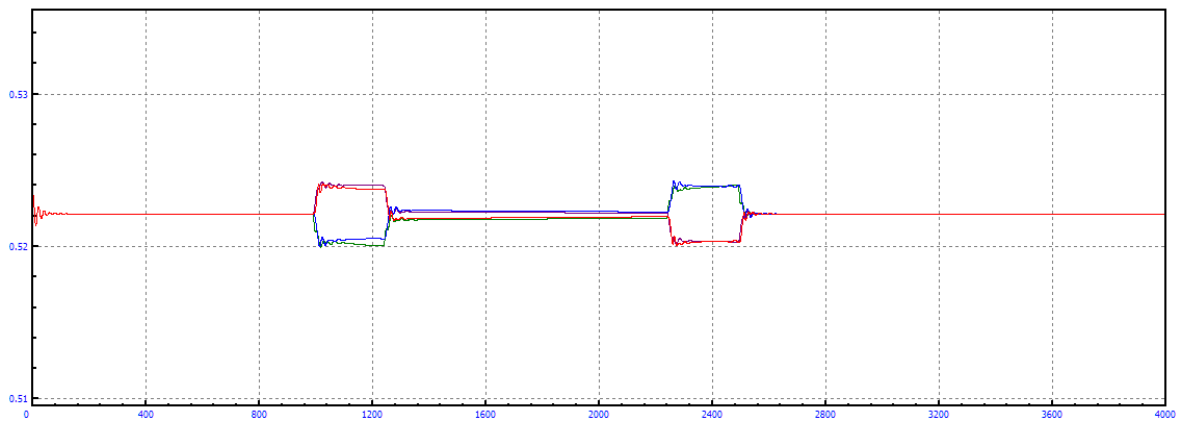


Figura A.170: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=25\text{m/s}$

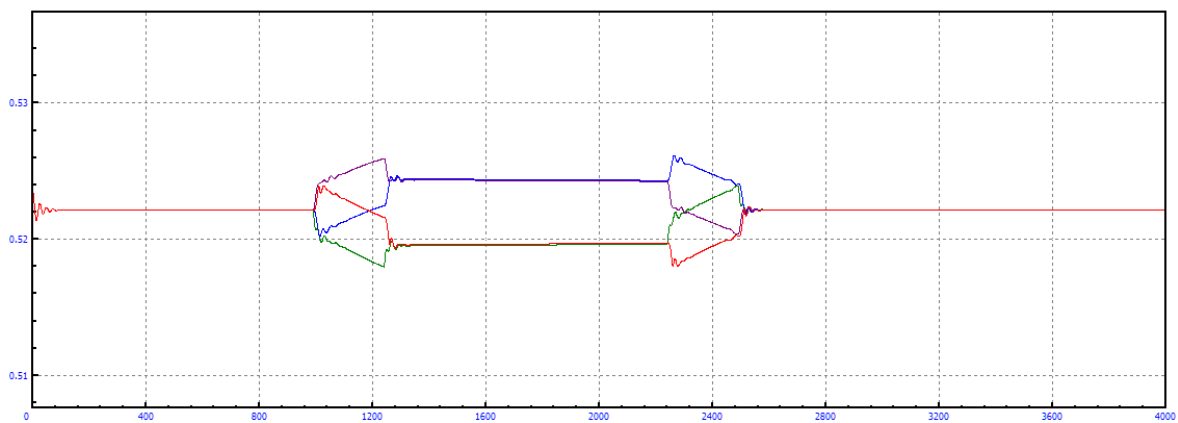


Figura A.171: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=30\text{m/s}$

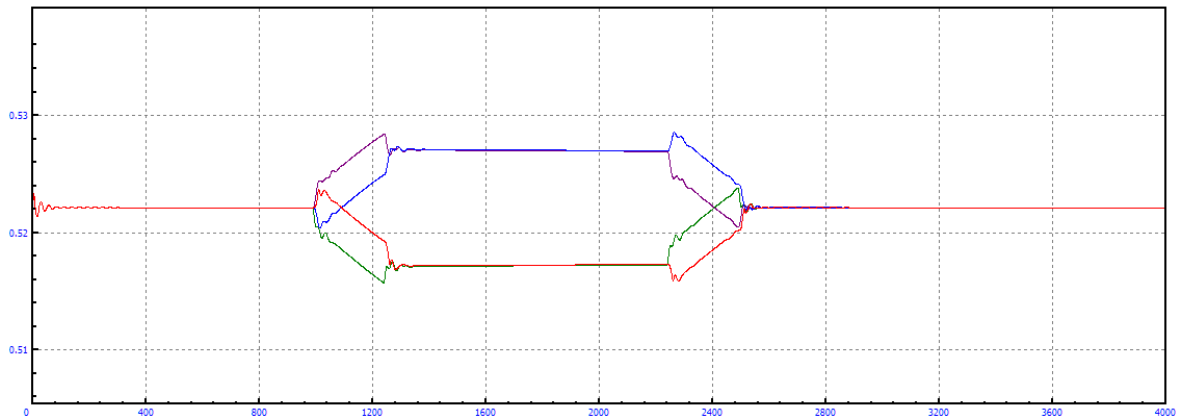


Figura A.172: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=35\text{m/s}$

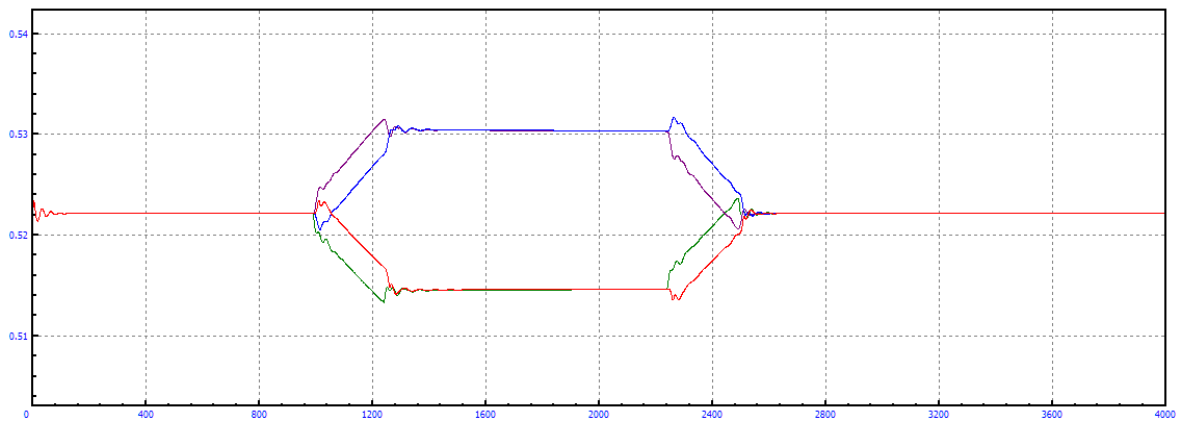


Figura A.173: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=40\text{m/s}$

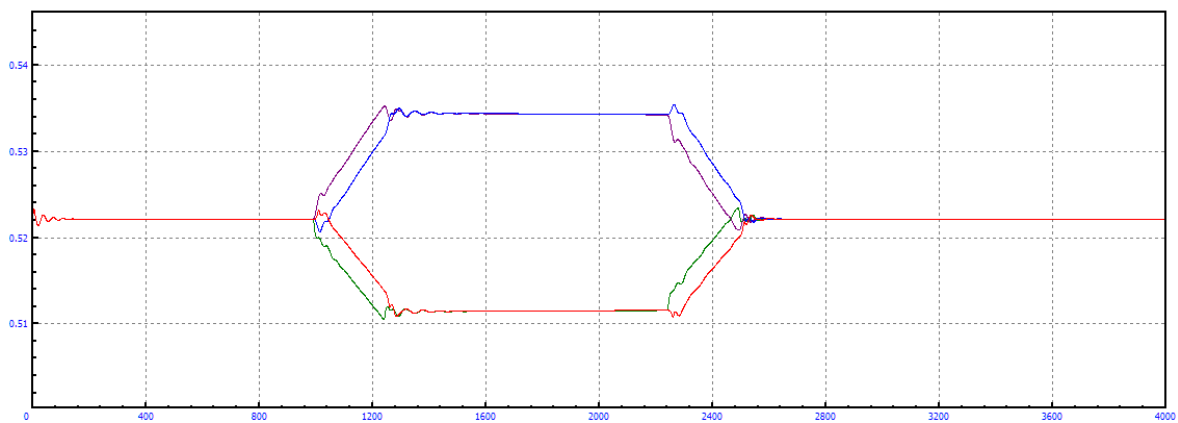


Figura A.174: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=45\text{m/s}$

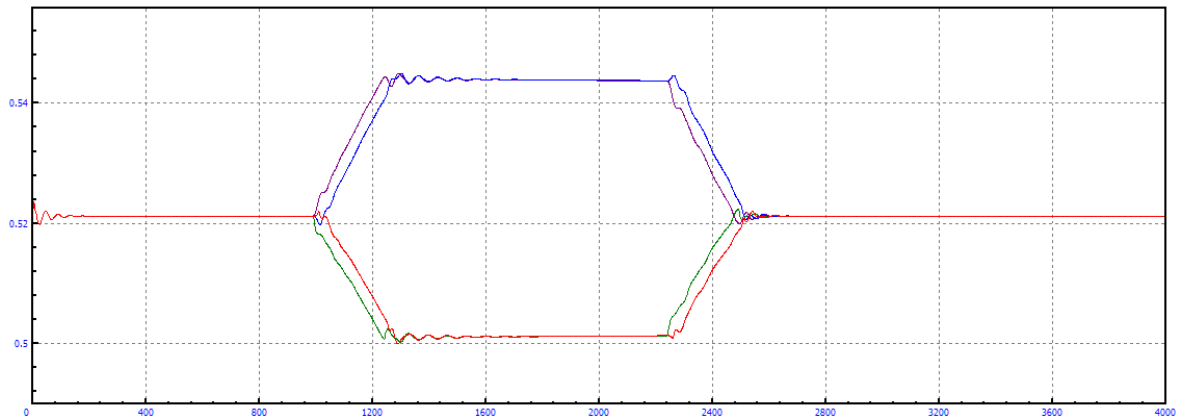


Figura A.175: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=50\text{m/s}$

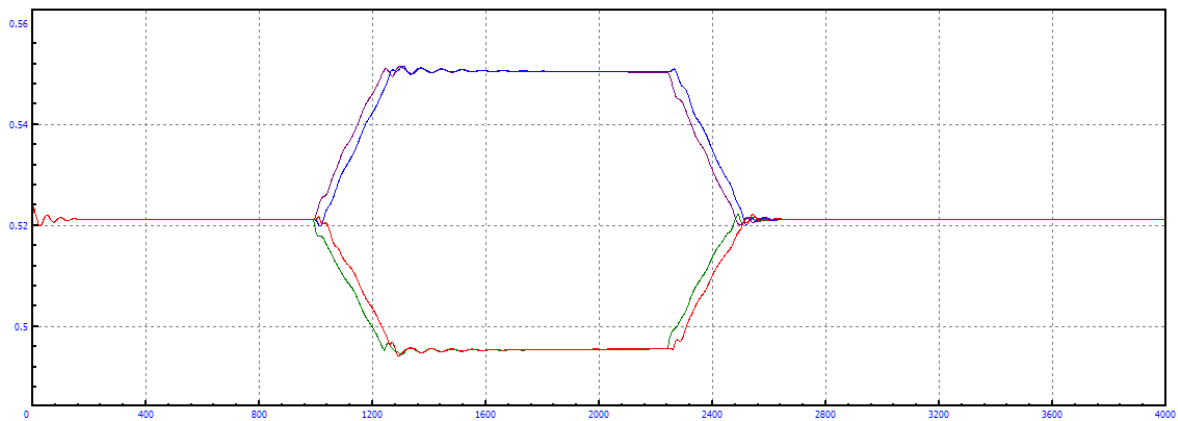


Figura A.176: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=55\text{m/s}$

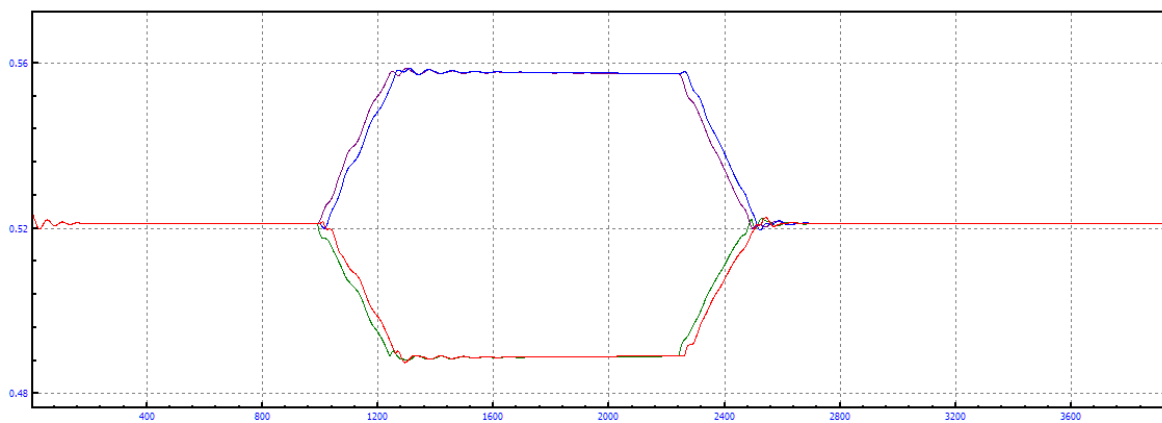


Figura A.177: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=60\text{m/s}$

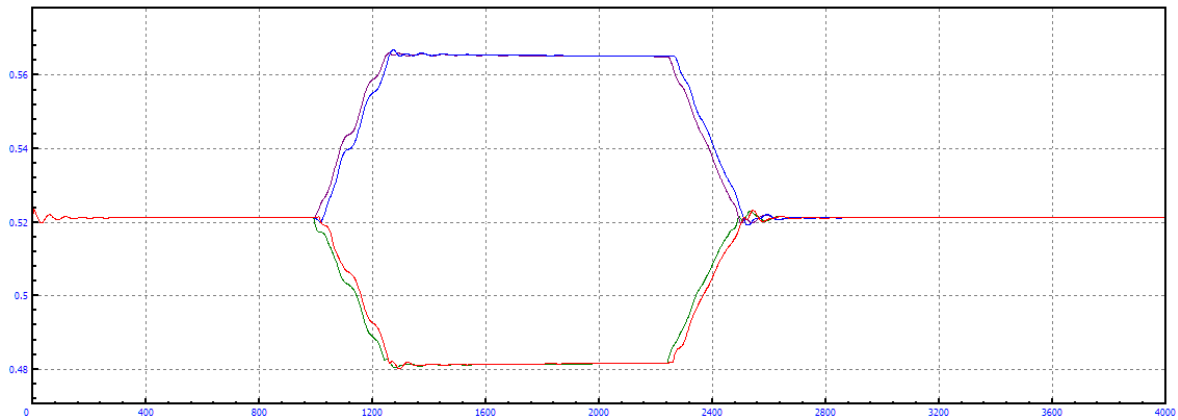


Figura A.178: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=65\text{m/s}$

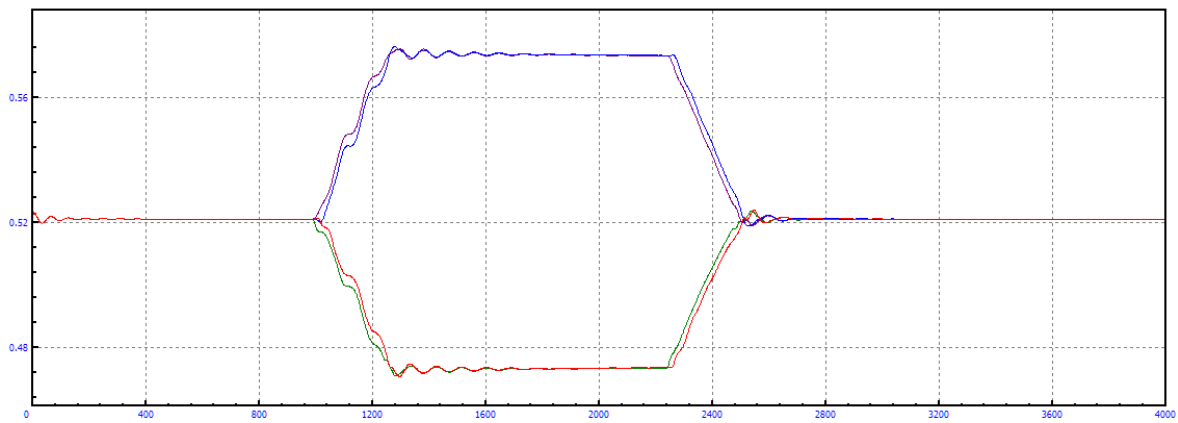


Figura A.179: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=70\text{m/s}$

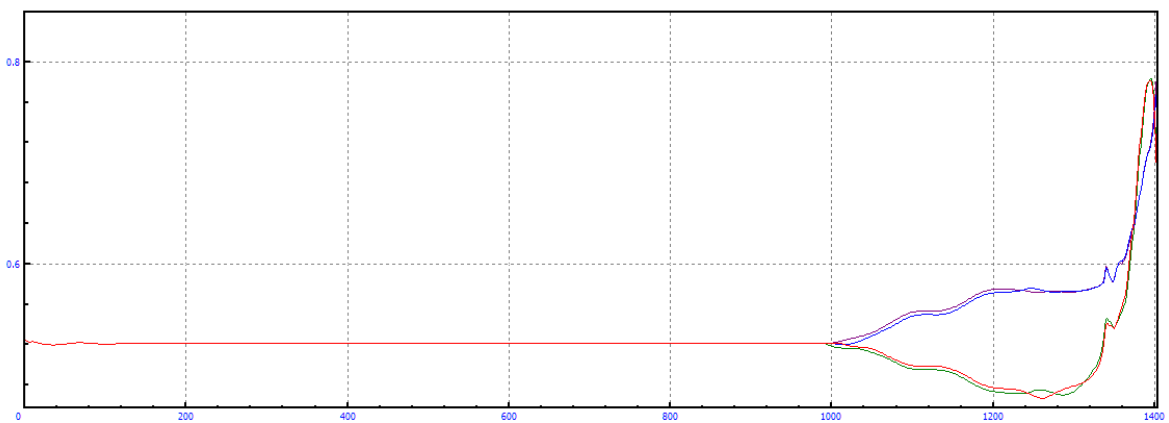


Figura A.180: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +60% y $V=75\text{m/s}$

B.1.9 MODIFICACIÓN=+80%

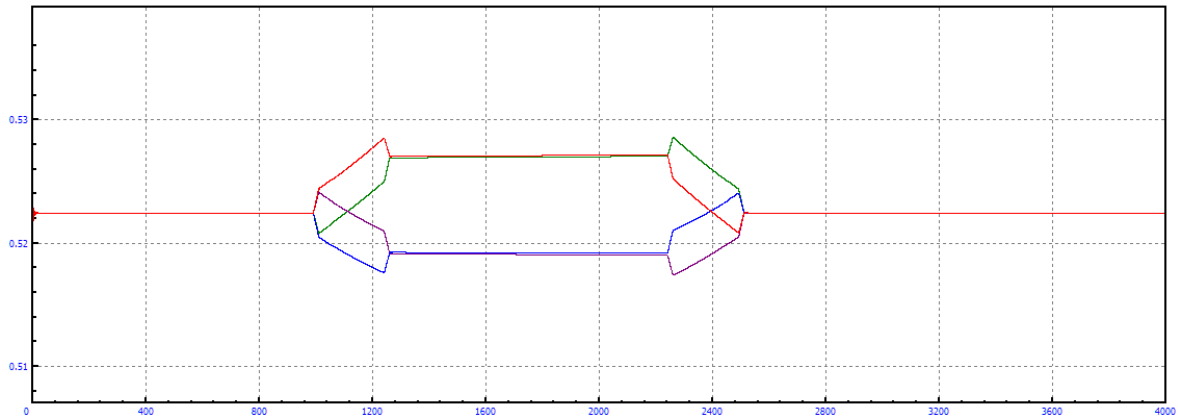


Figura A.181: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=5\text{m/s}$

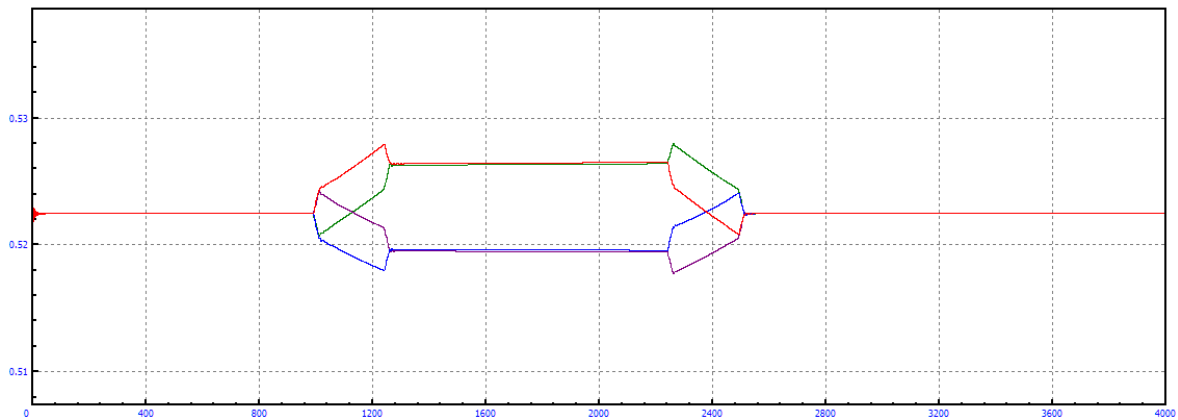


Figura A.182: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=10\text{m/s}$

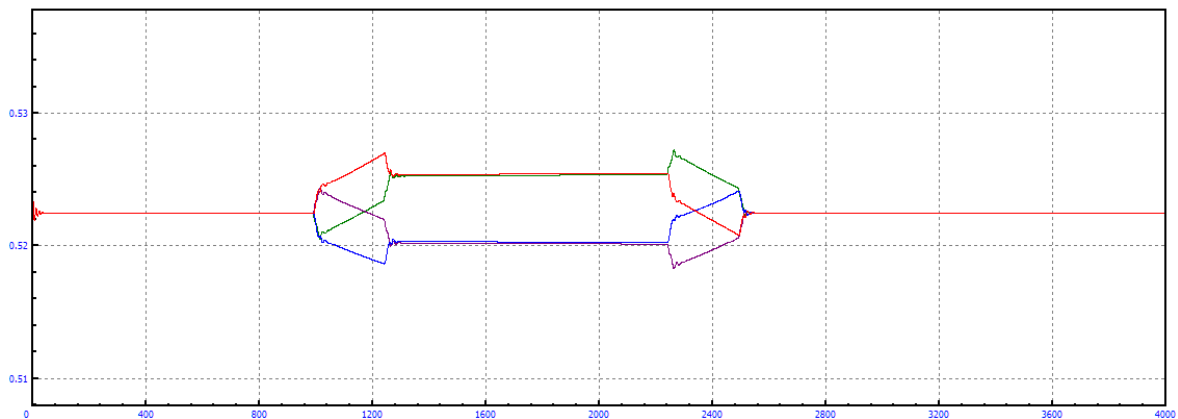


Figura A.183: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=15\text{m/s}$

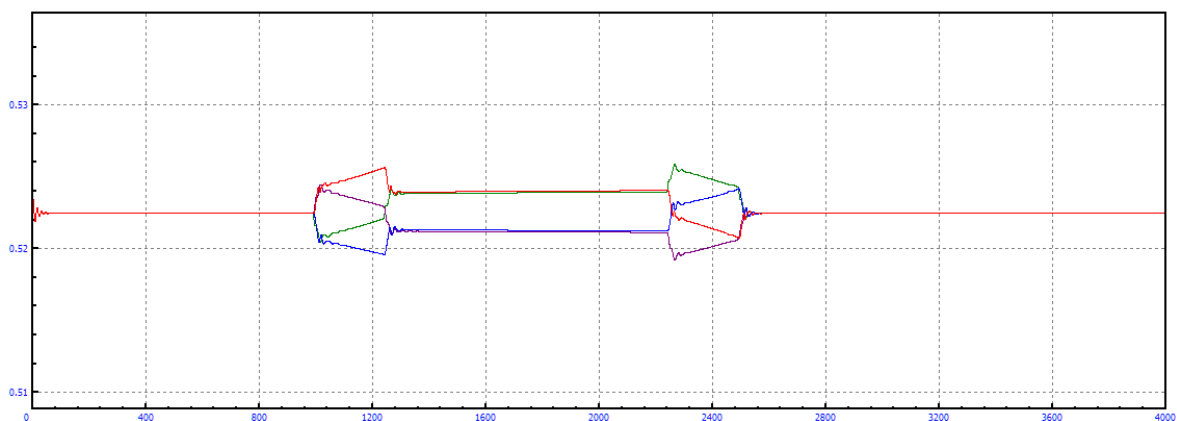


Figura A.184: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=20\text{m/s}$

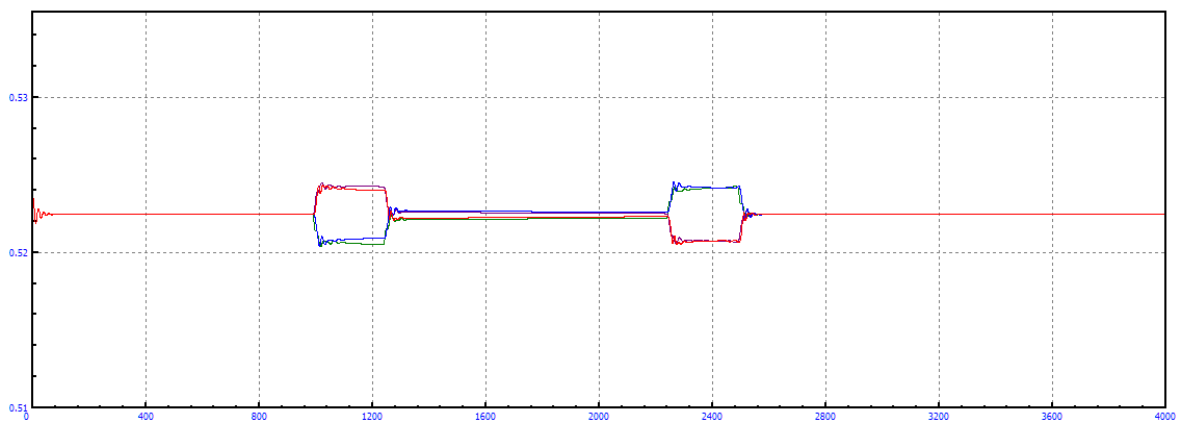


Figura A.185: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=25\text{m/s}$

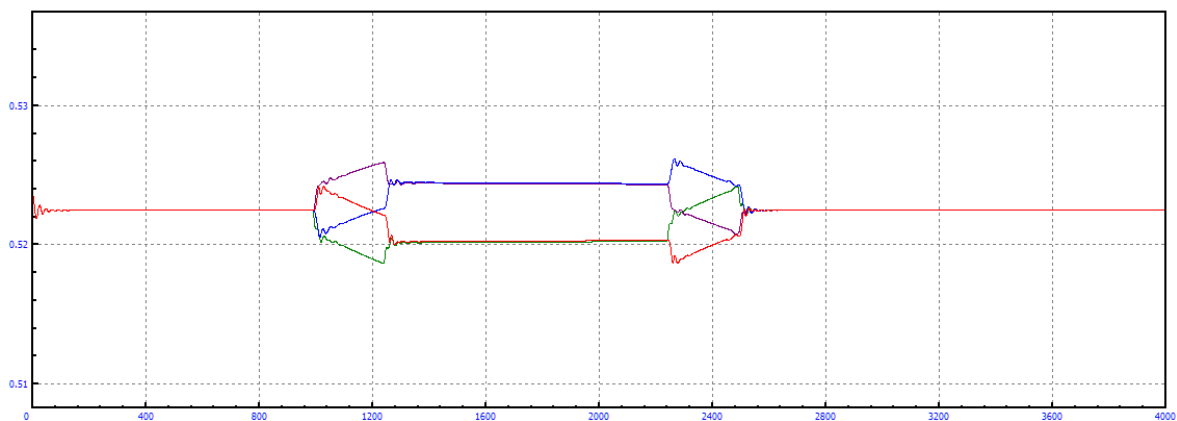


Figura A.186: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=30\text{m/s}$

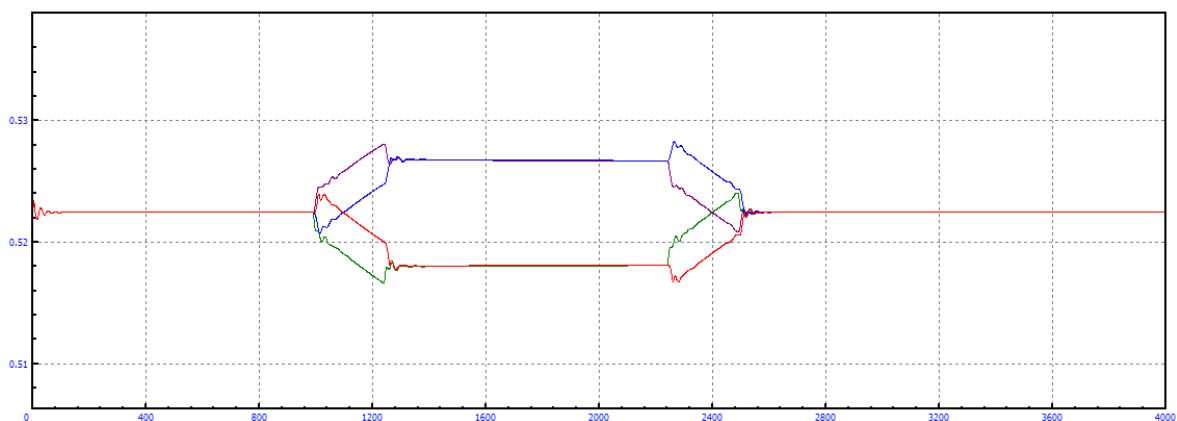


Figura A.187: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=35\text{m/s}$

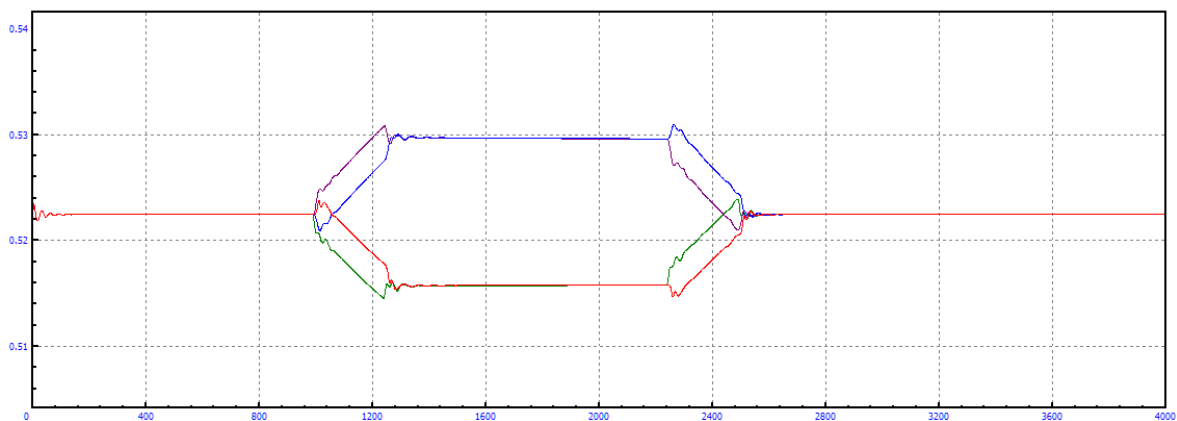


Figura A.188: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=40\text{m/s}$

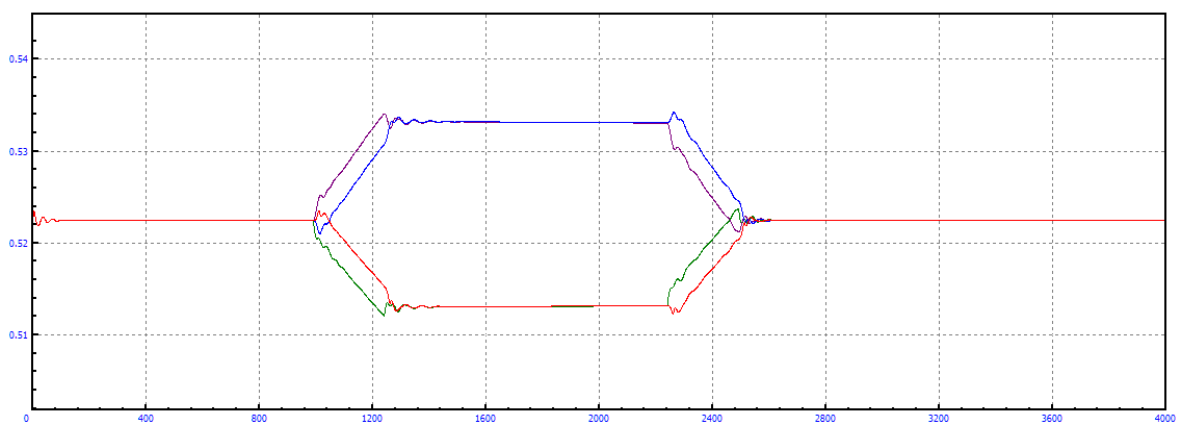


Figura A.189: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=45\text{m/s}$

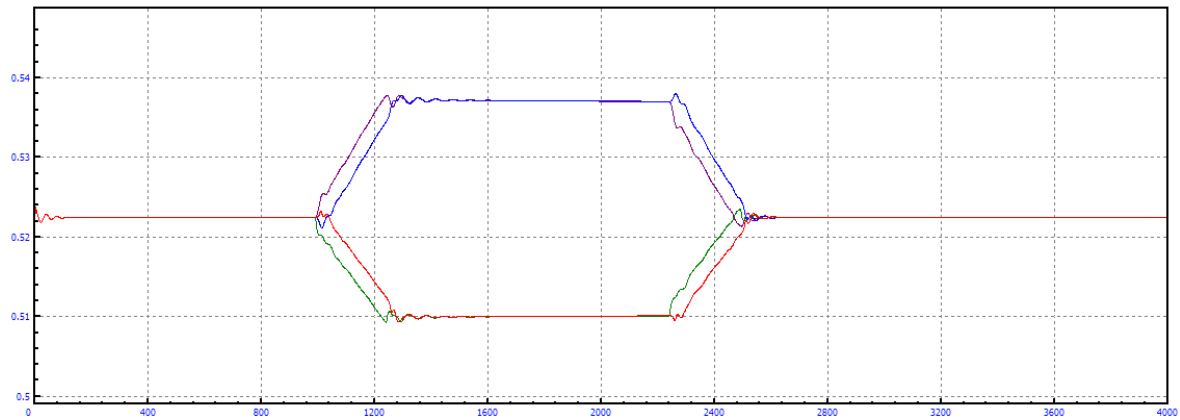


Figura A.190: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=50\text{m/s}$

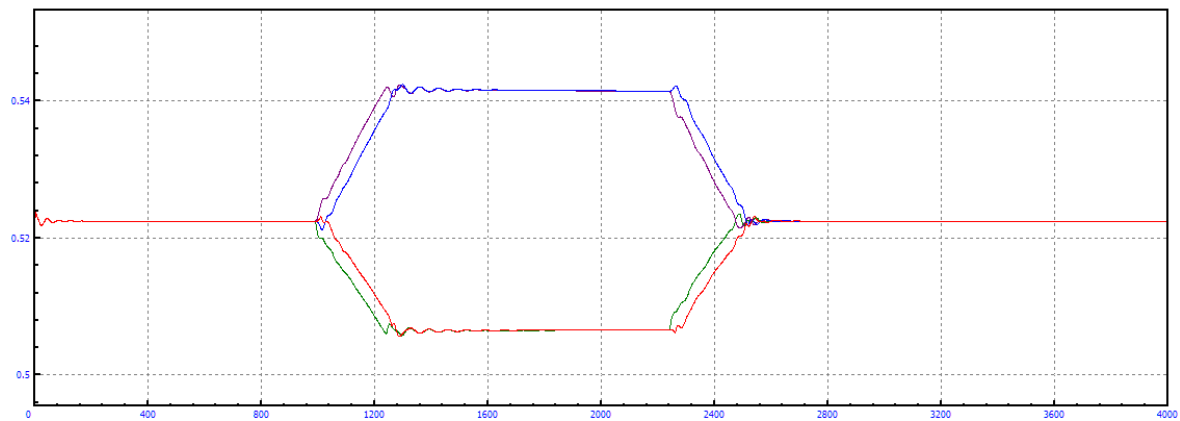


Figura A.191: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=55\text{m/s}$

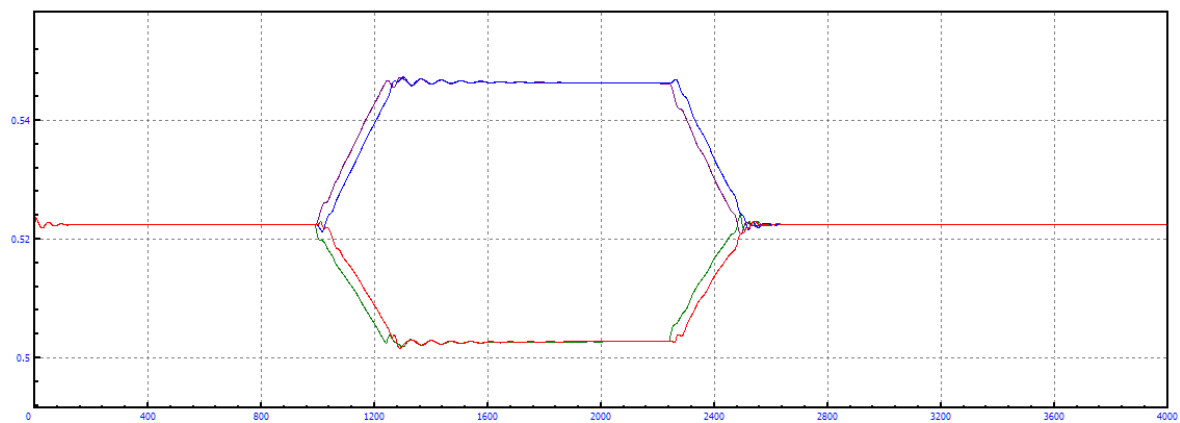


Figura A.192: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=60\text{m/s}$

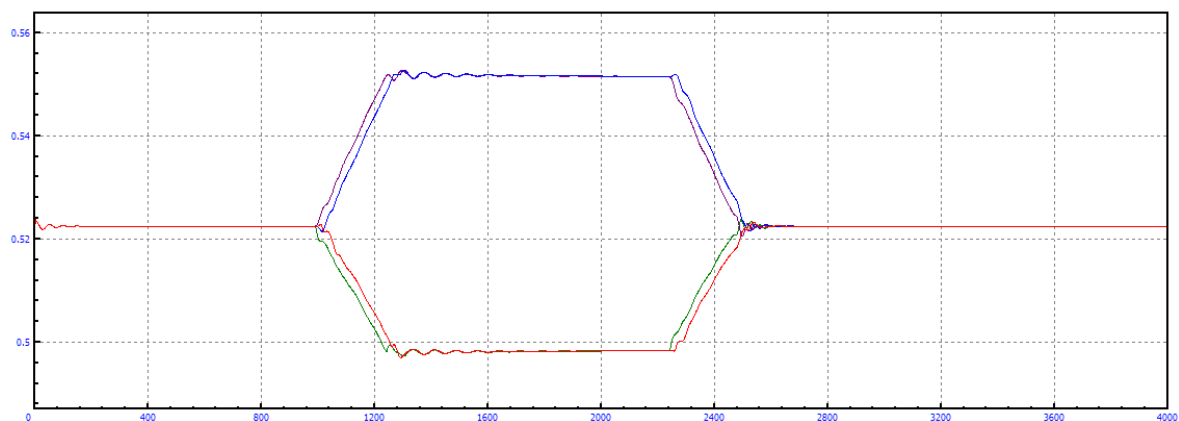


Figura A.193: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=65\text{m/s}$

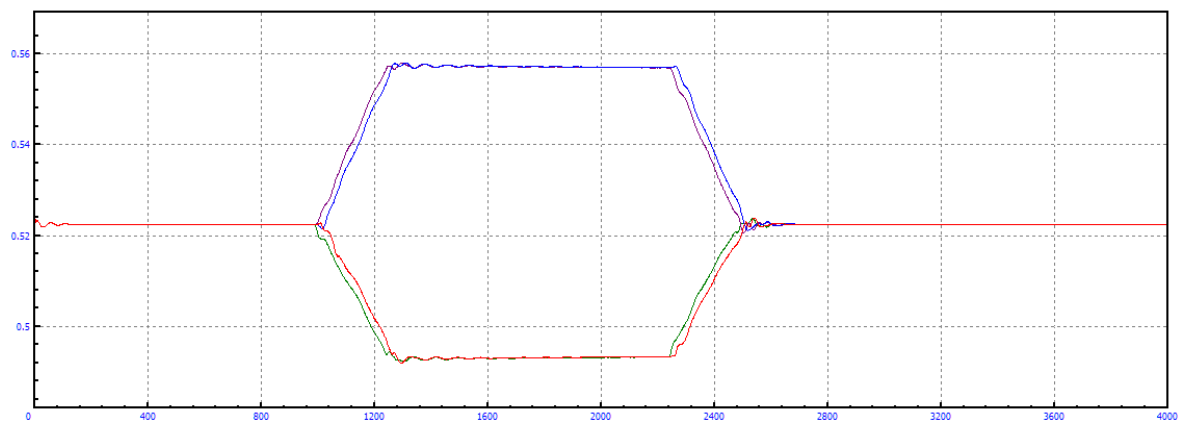


Figura A.194: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=70\text{m/s}$

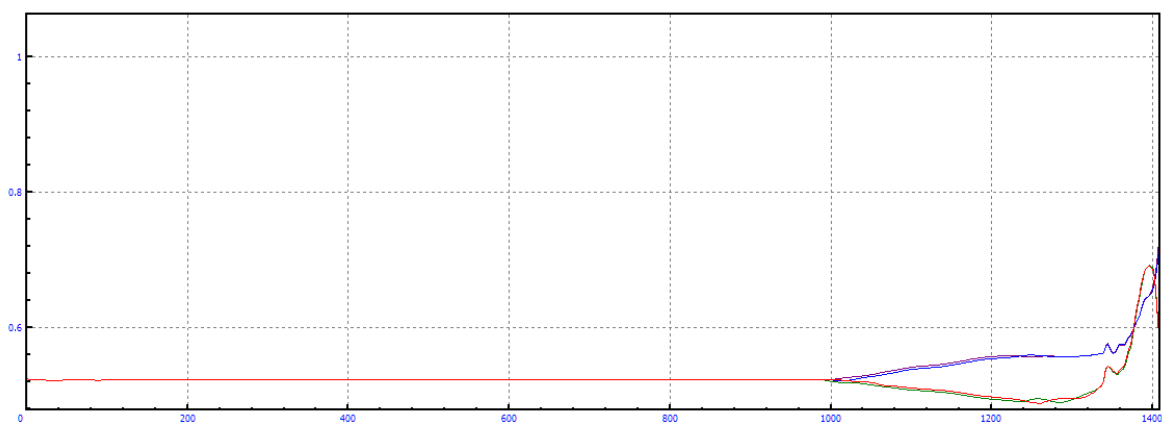


Figura A.195: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +80% y $V=75\text{m/s}$

B.1.10 MODIFICACIÓN=+100%

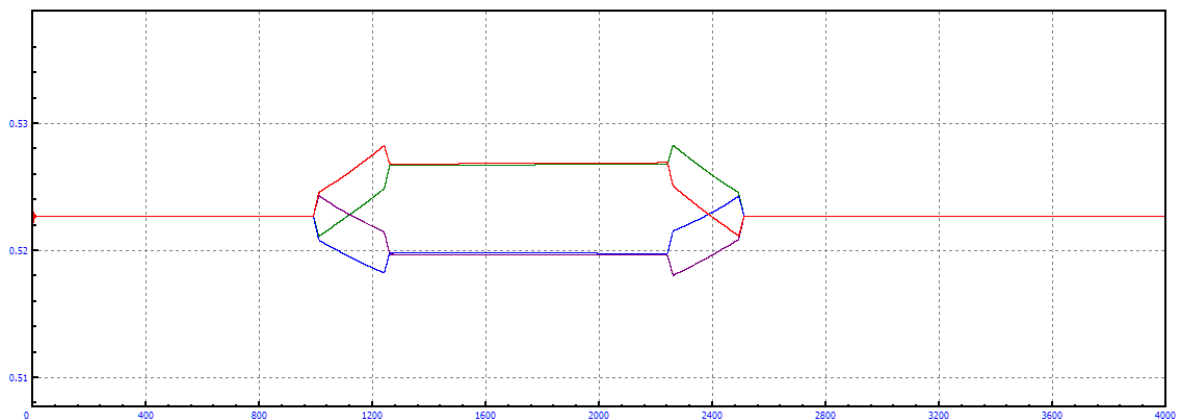


Figura A.196: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=5\text{m/s}$

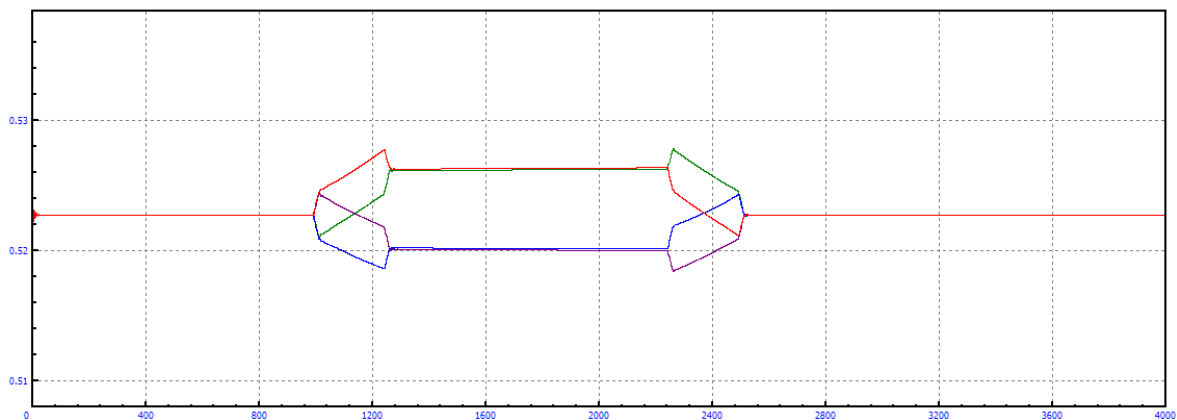


Figura A.197: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=10\text{m/s}$

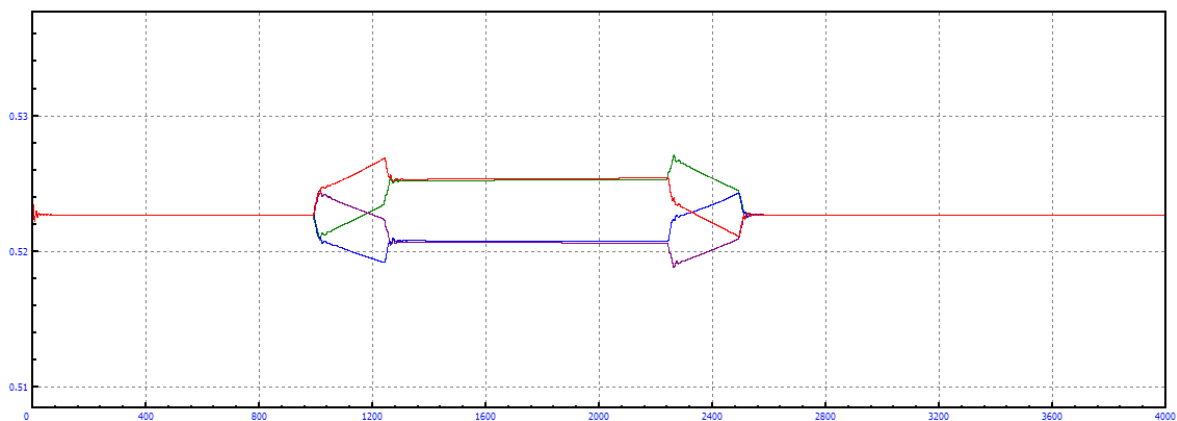


Figura A.198: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=15\text{m/s}$

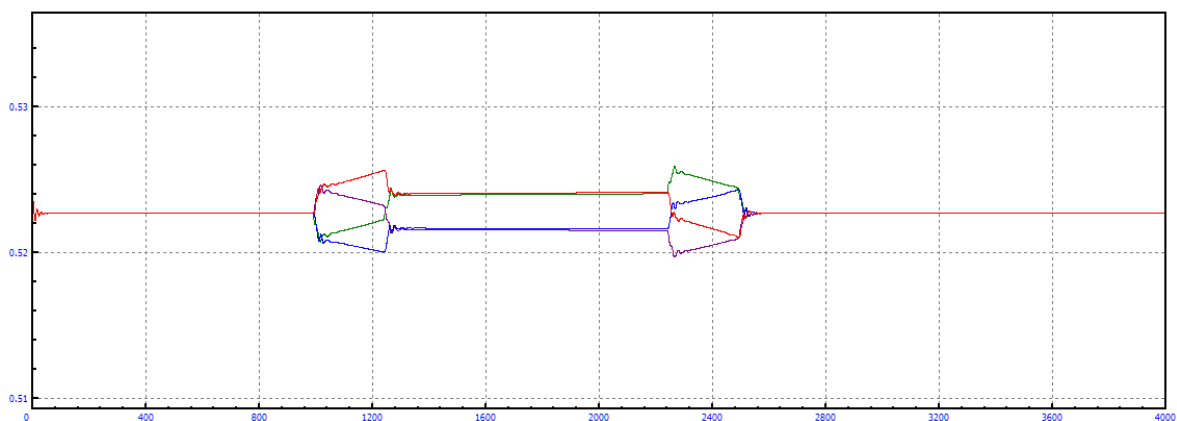


Figura A.199: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=20\text{m/s}$

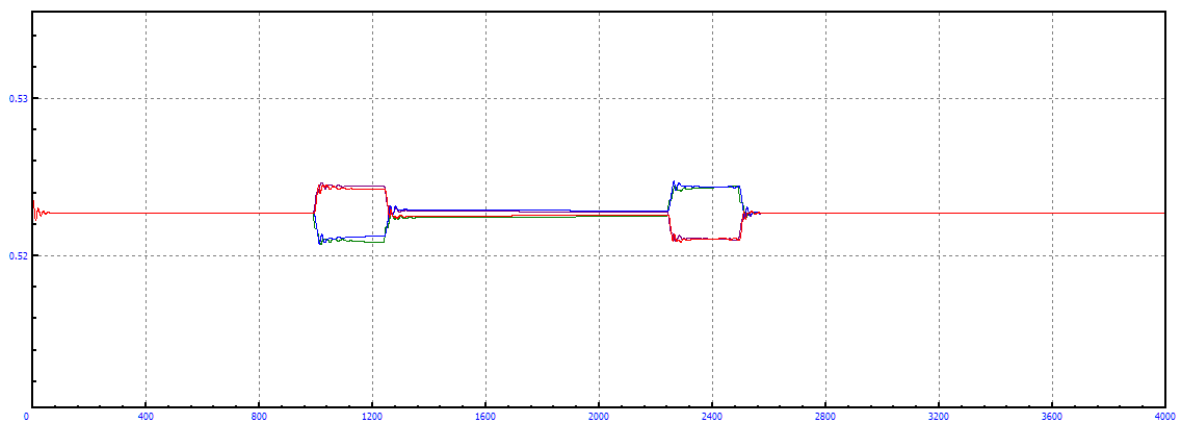


Figura A.200: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=25\text{m/s}$

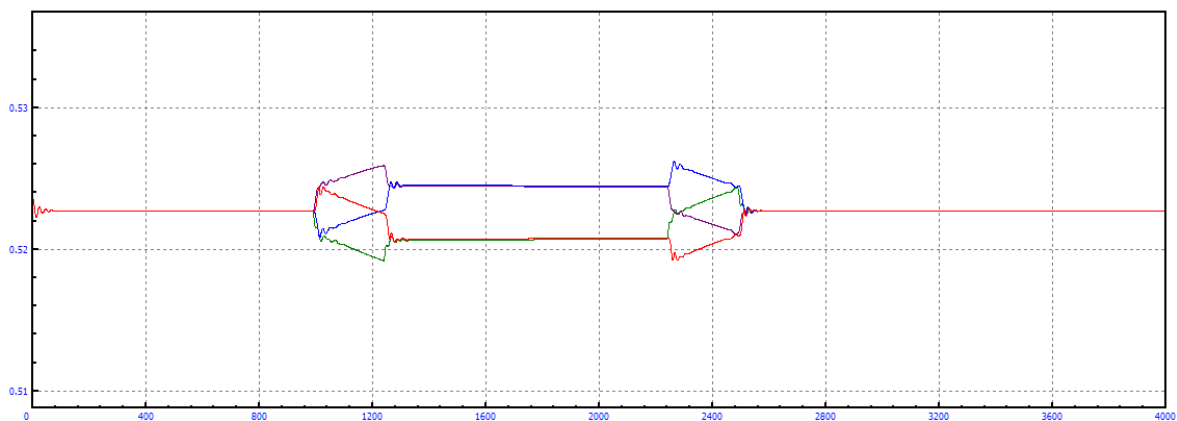


Figura A.201: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=30\text{m/s}$

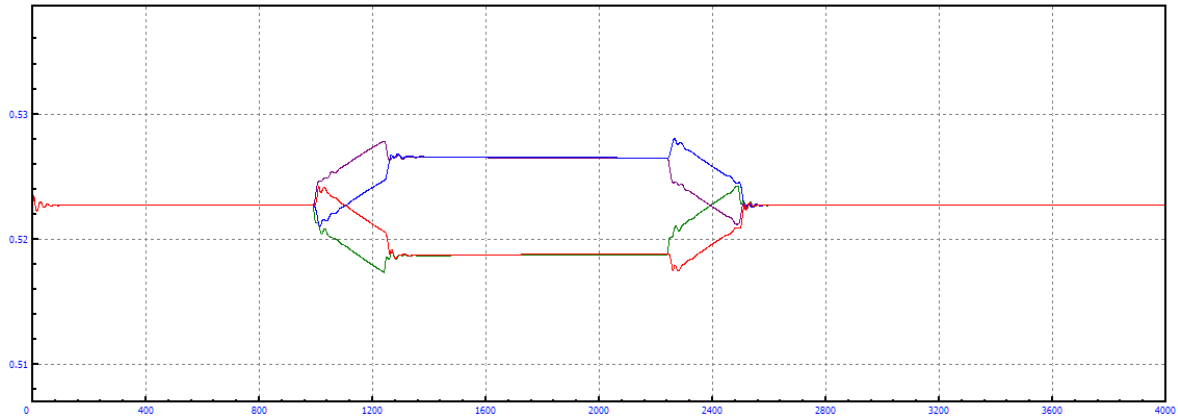


Figura A.202: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=35\text{m/s}$

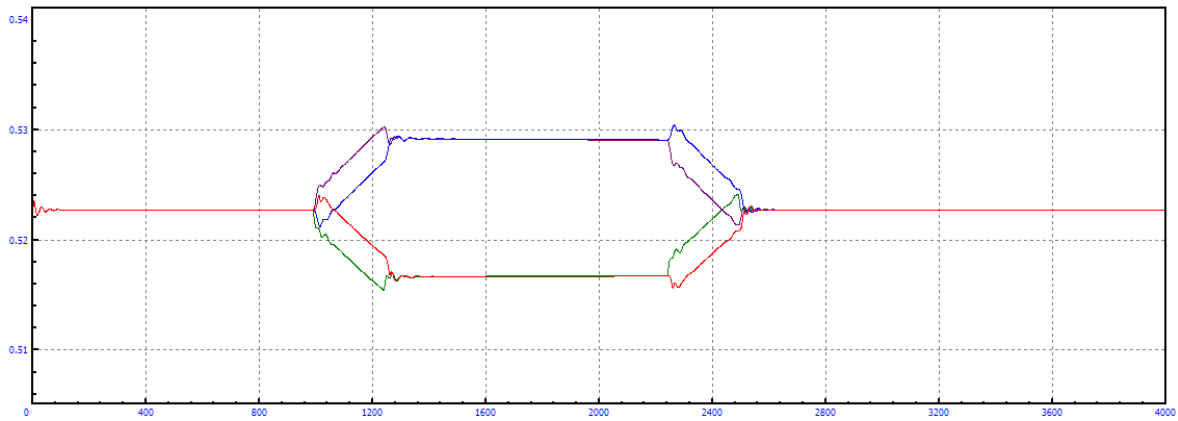


Figura A.203: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=40\text{m/s}$

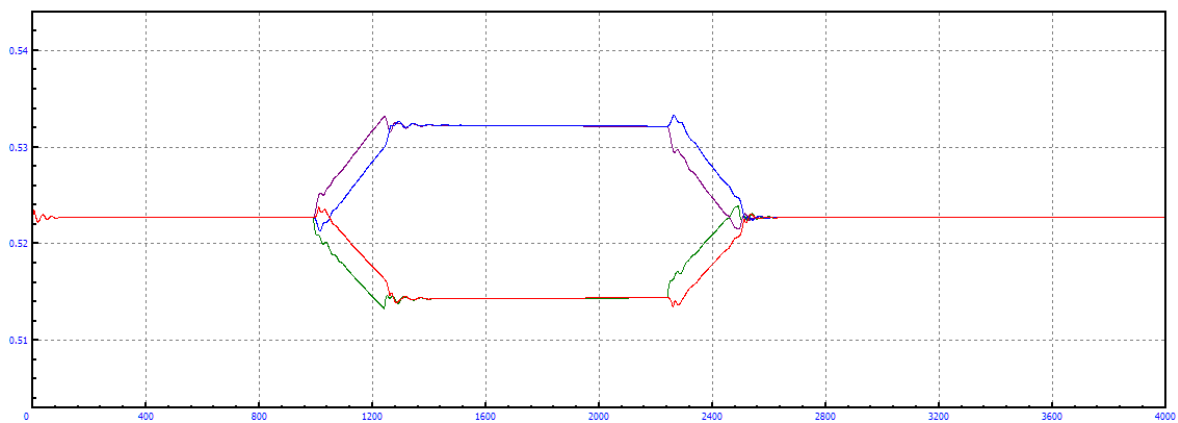


Figura A.204: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=45\text{m/s}$

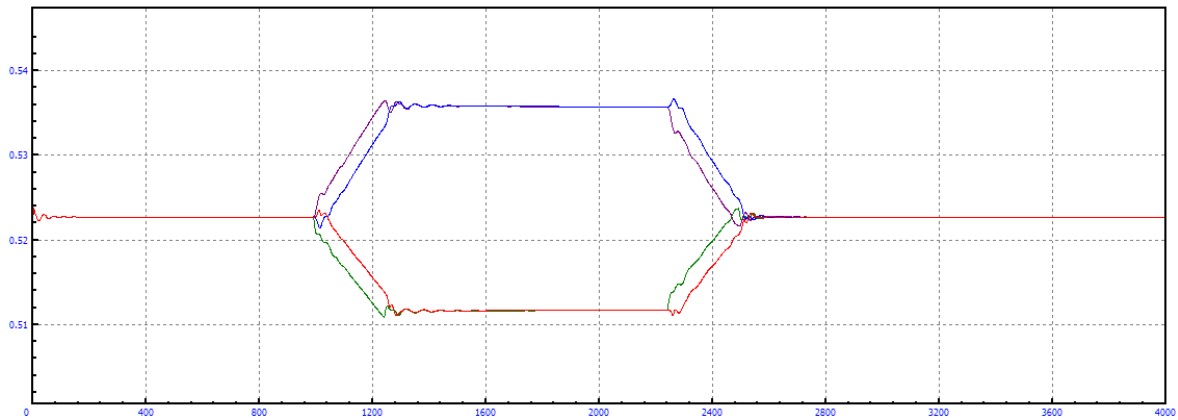


Figura A.205: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=50\text{m/s}$

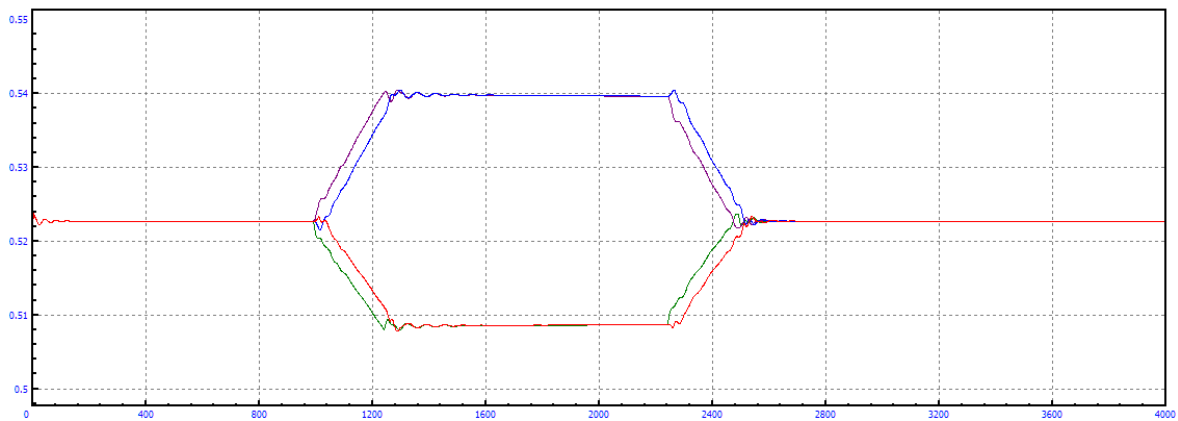


Figura A.206: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=55\text{m/s}$

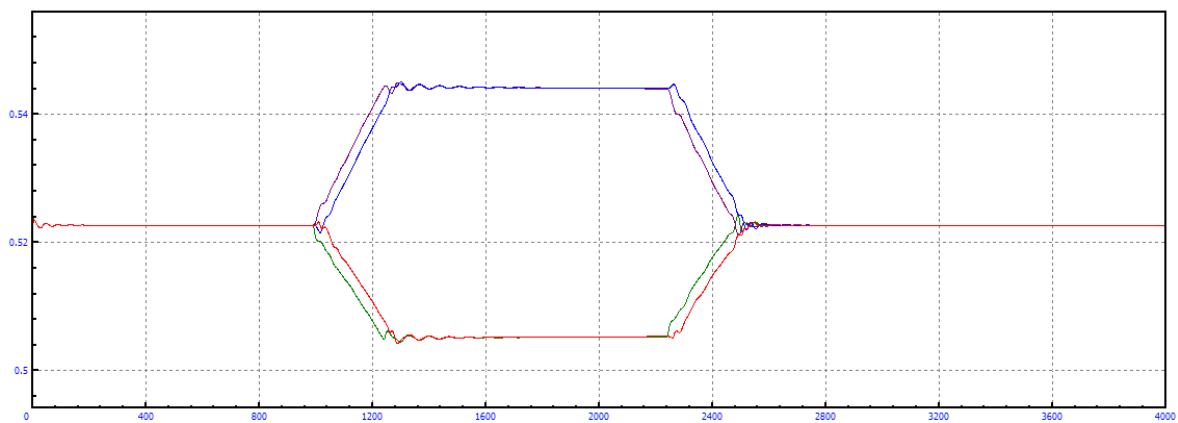


Figura A.207: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=60\text{m/s}$

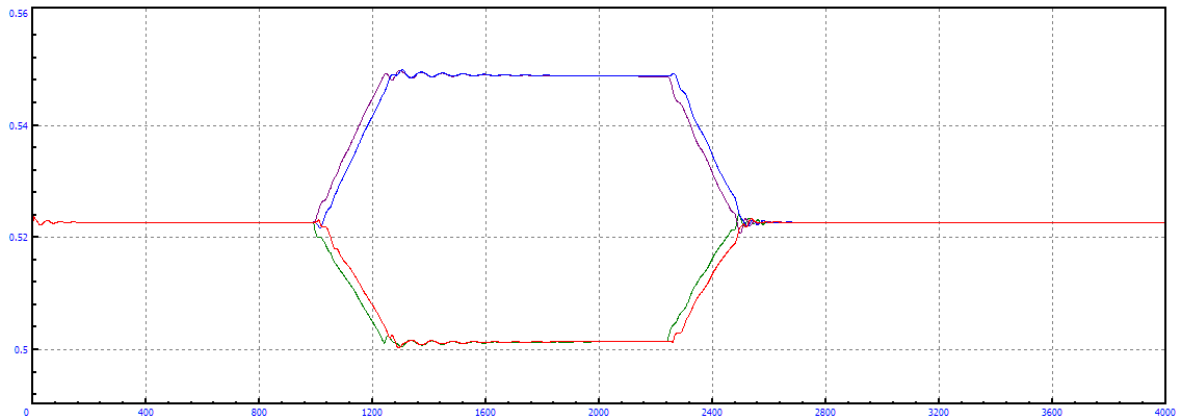


Figura A.208: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=65\text{m/s}$

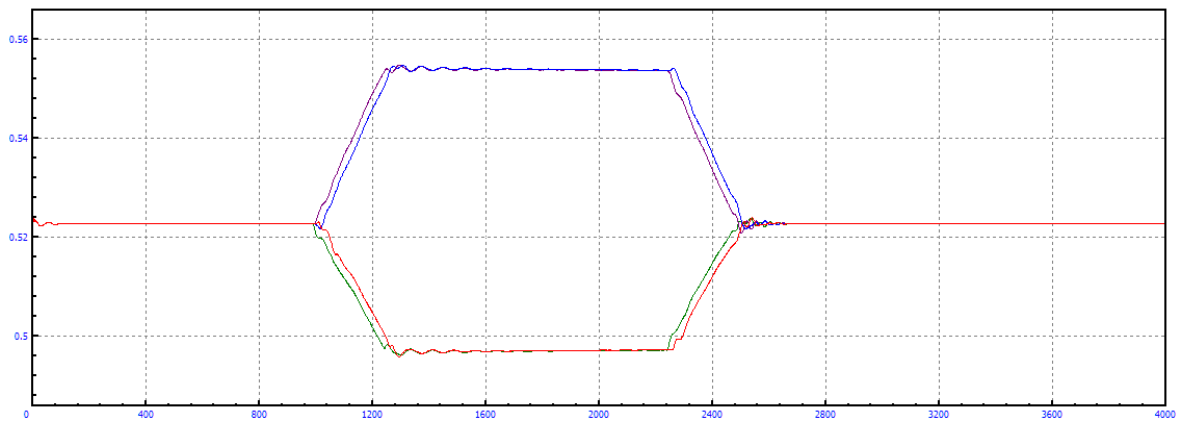


Figura A.209: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=70\text{m/s}$

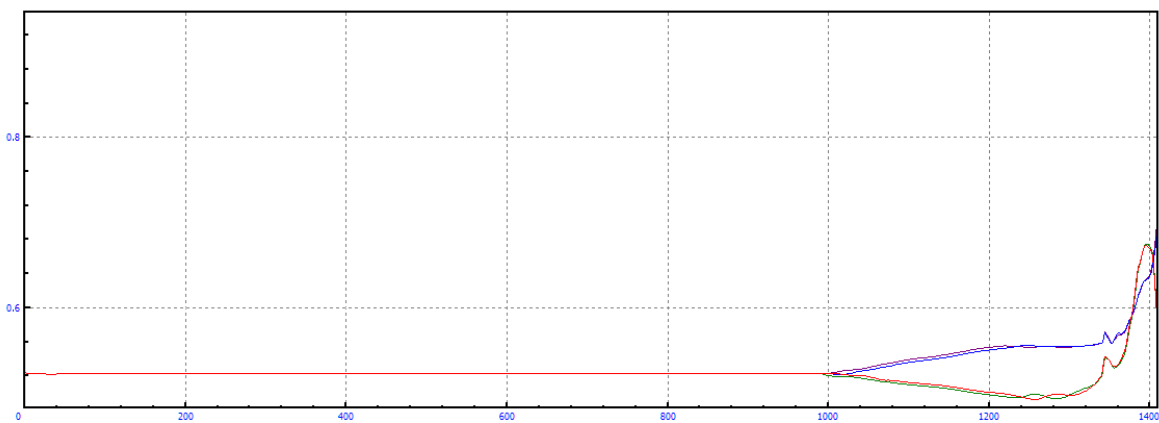


Figura A.210: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, amortiguación secundaria= +100% y $V=75\text{m/s}$

B.2 RADIO 2KM

B.2.1 MODIFICACIÓN=-80%

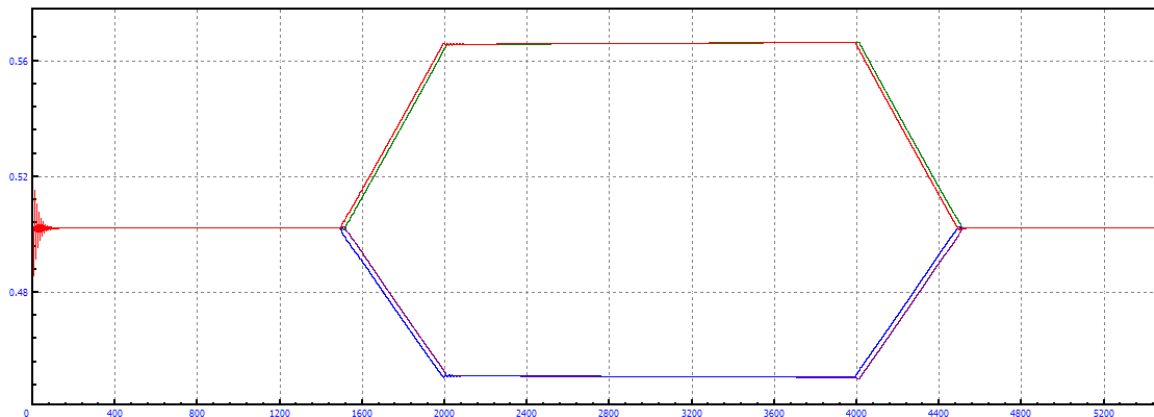


Figura A.211: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -80% y V=5m/s

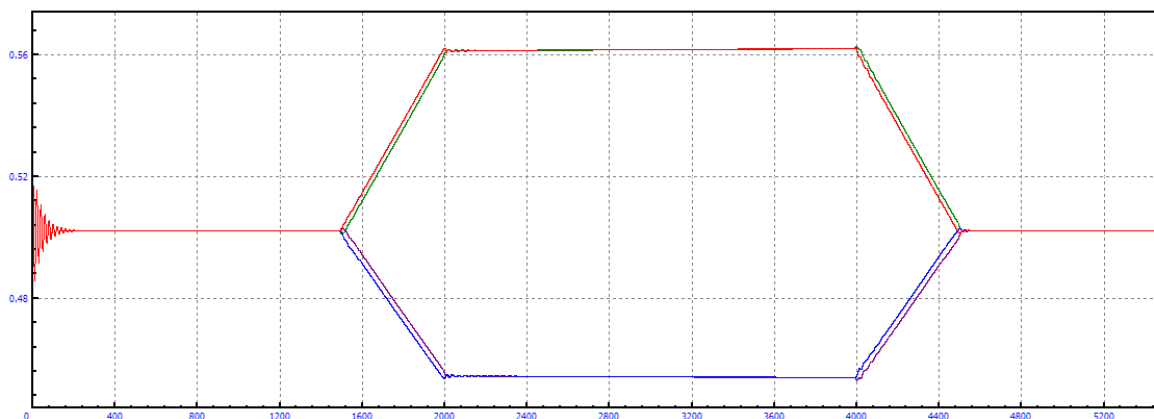


Figura A.212: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -80% y V=10m/s

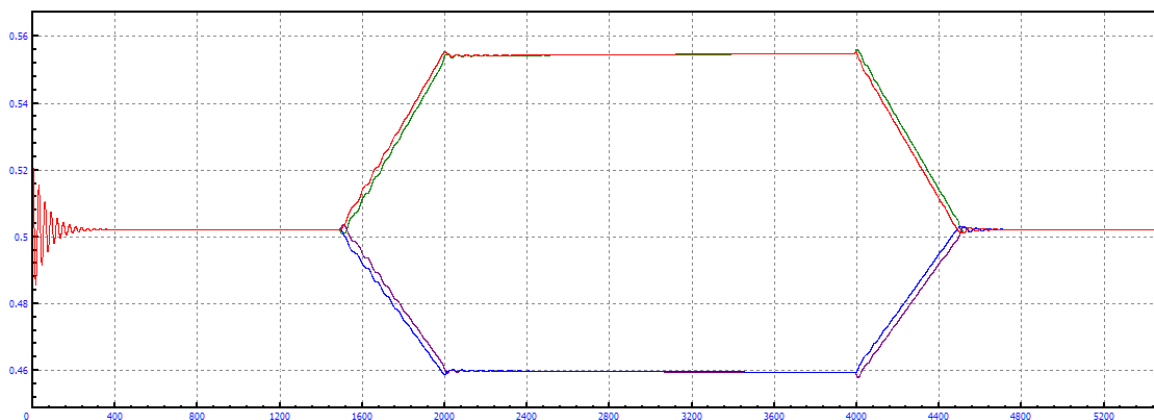


Figura A.213: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -80% y V=15m/s

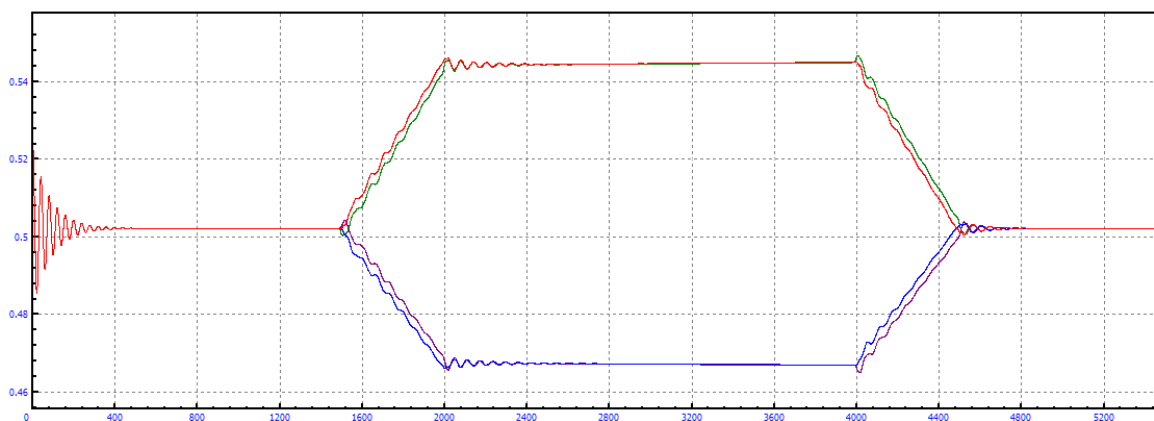


Figura A.214: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=20\text{m/s}$

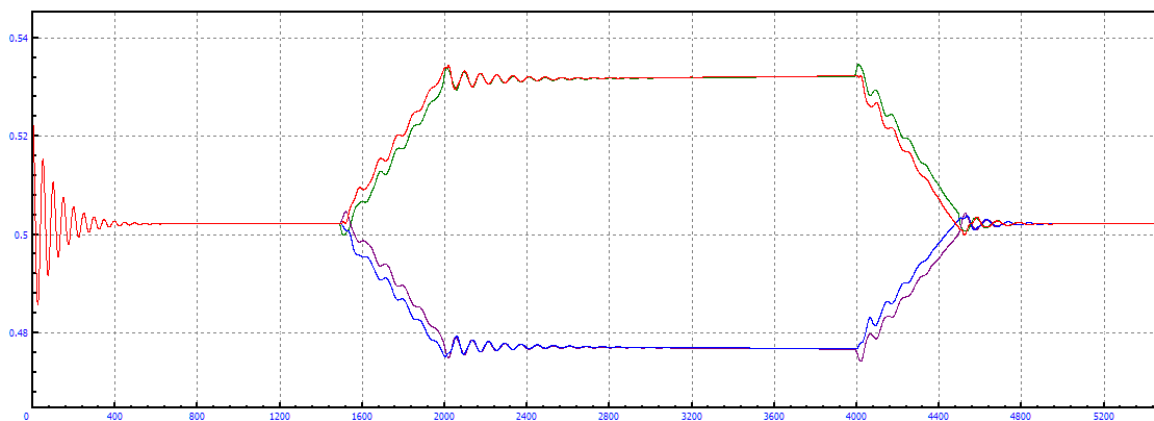


Figura A.215: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=25\text{m/s}$

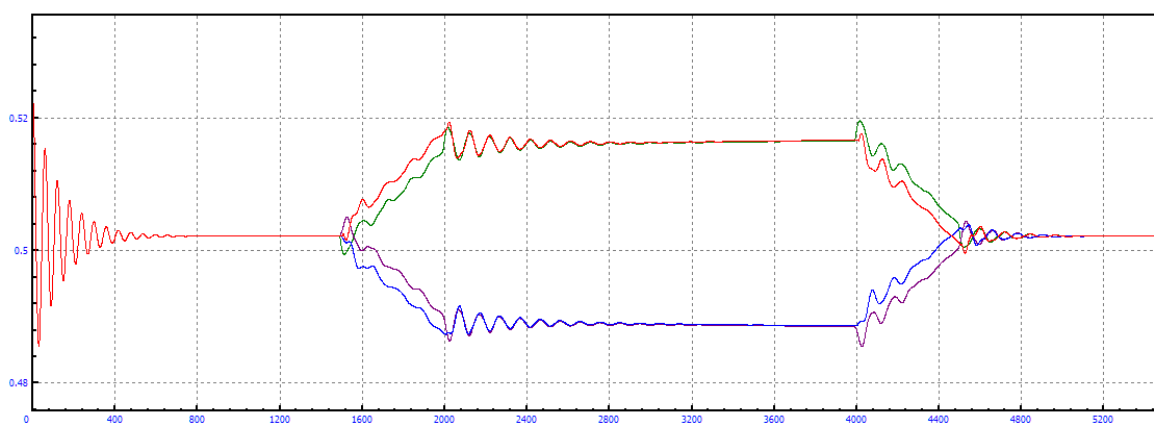


Figura A.216: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=30\text{m/s}$

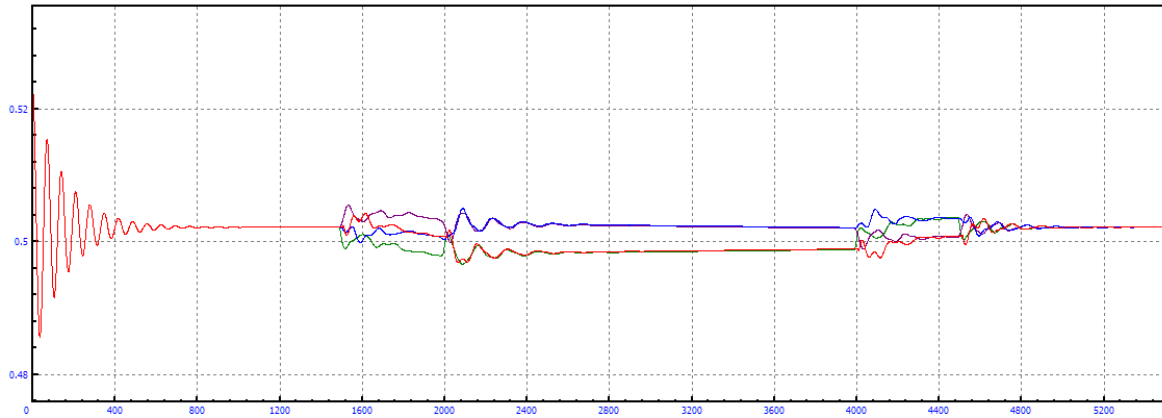


Figura A.217: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=35\text{m/s}$

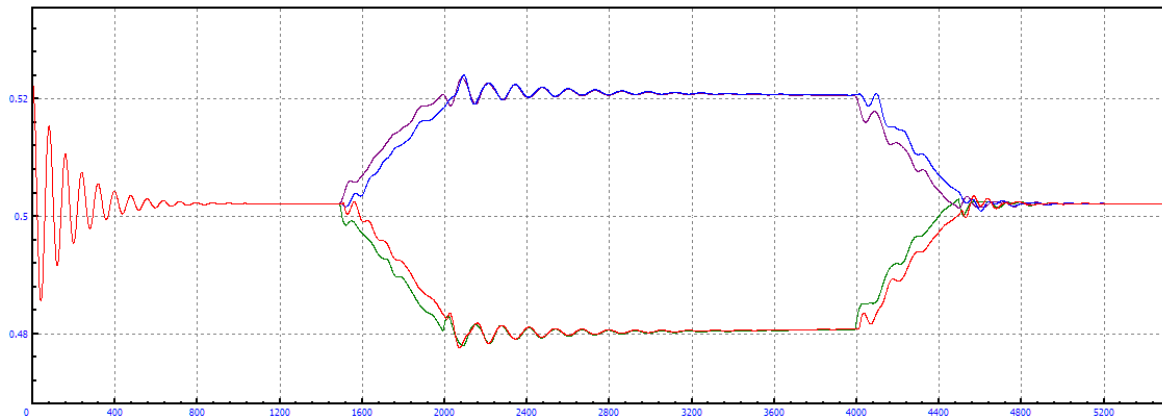


Figura A.218: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=40\text{m/s}$

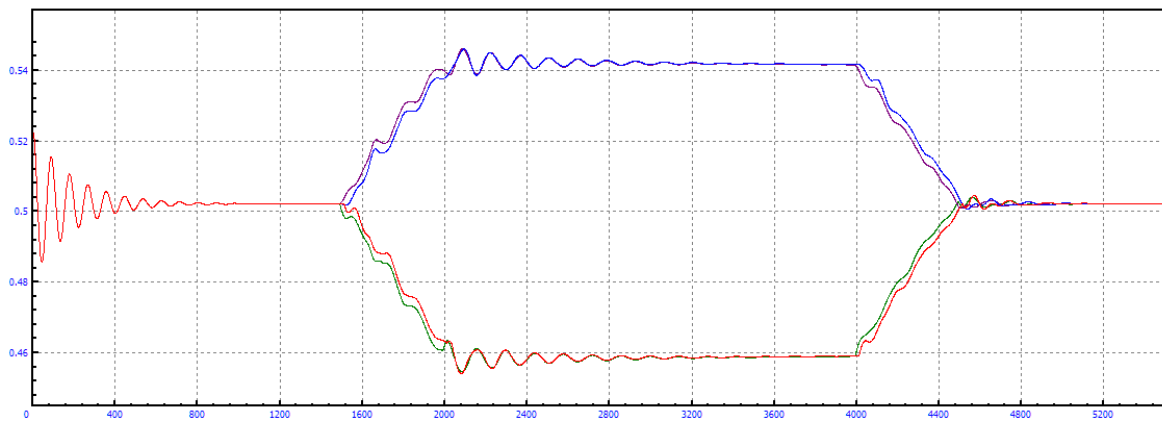


Figura A.219: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=45\text{m/s}$

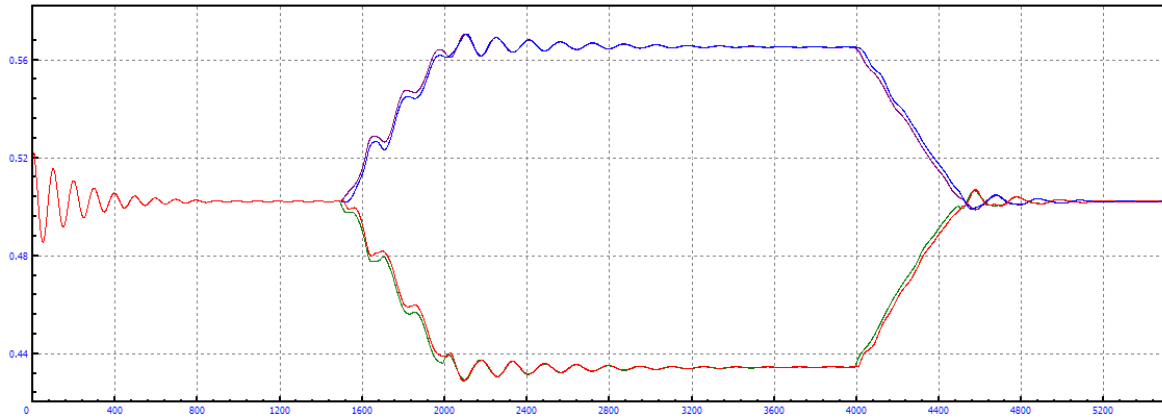


Figura A.220: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=50\text{m/s}$

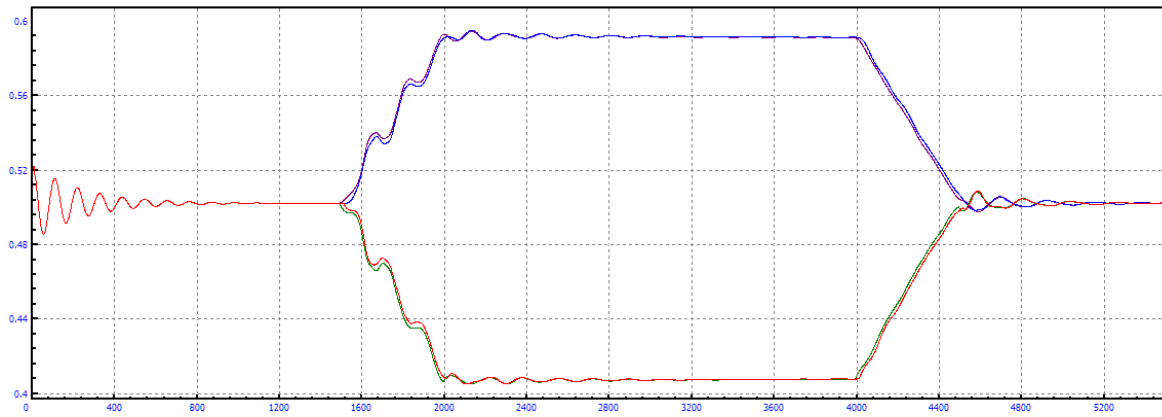


Figura A.221: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=55\text{m/s}$

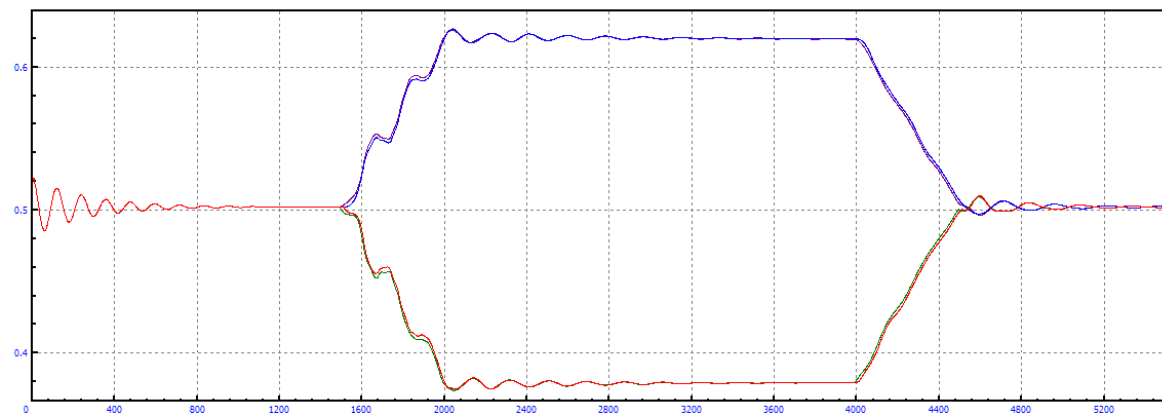


Figura A.222: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -80% y $V=60\text{m/s}$

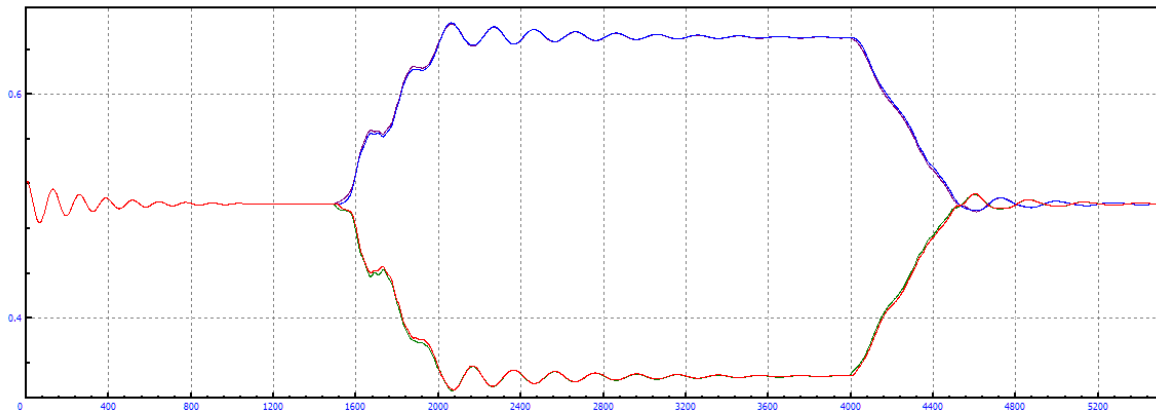


Figura A.223: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -80% y V=65m/s

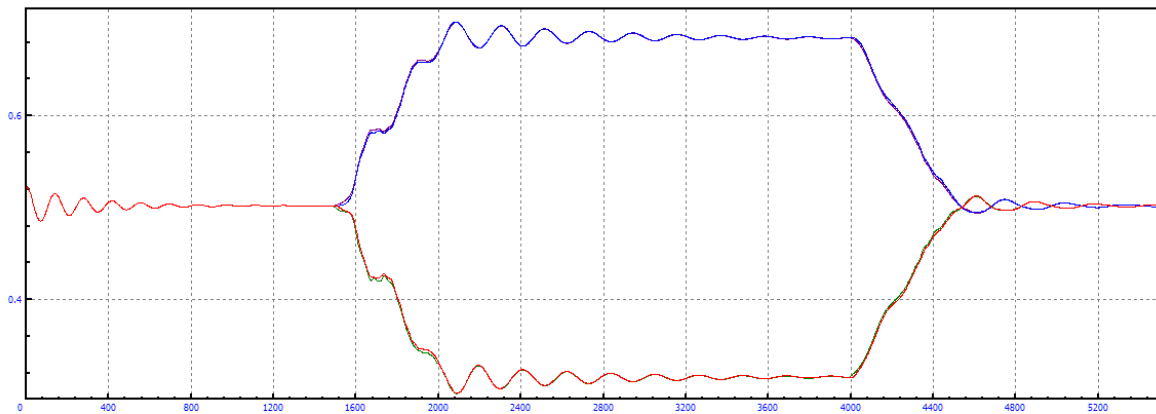


Figura A.224: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -80% y V=70m/s

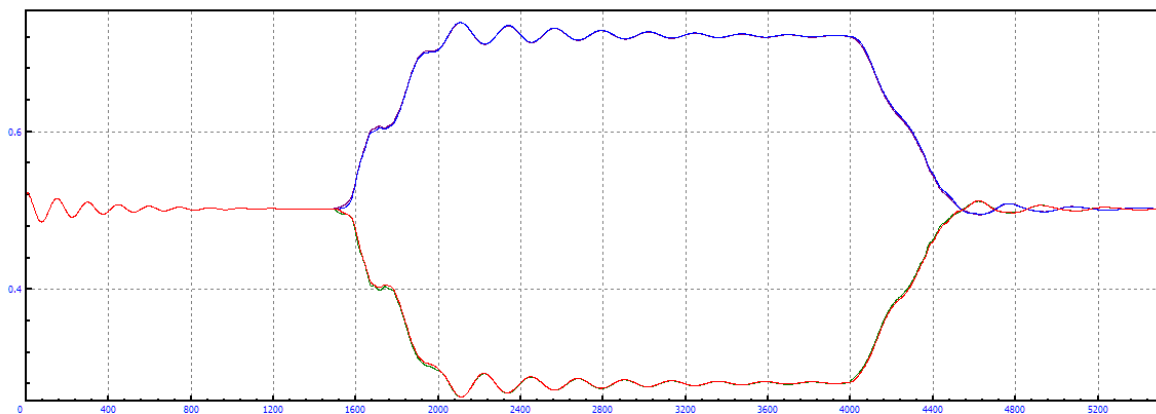


Figura A.225: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -80% y V=75m/s

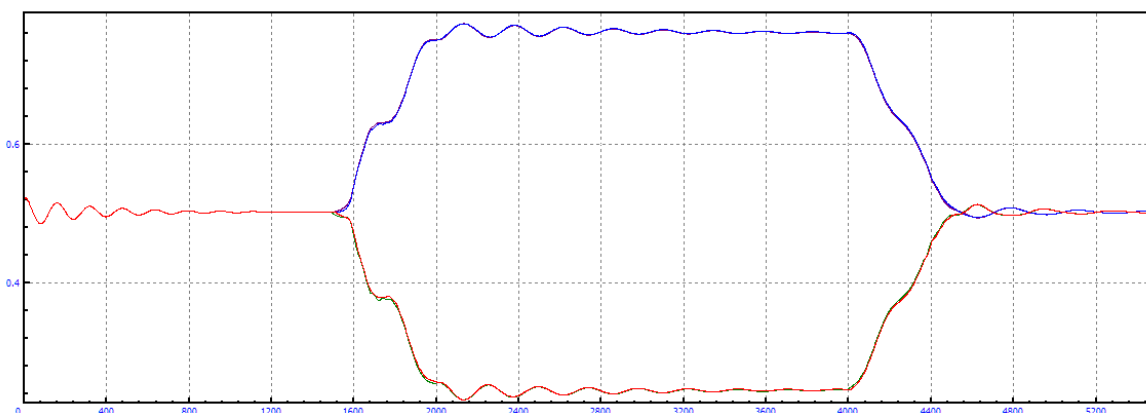


Figura A.226: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -80% y V=80m/s

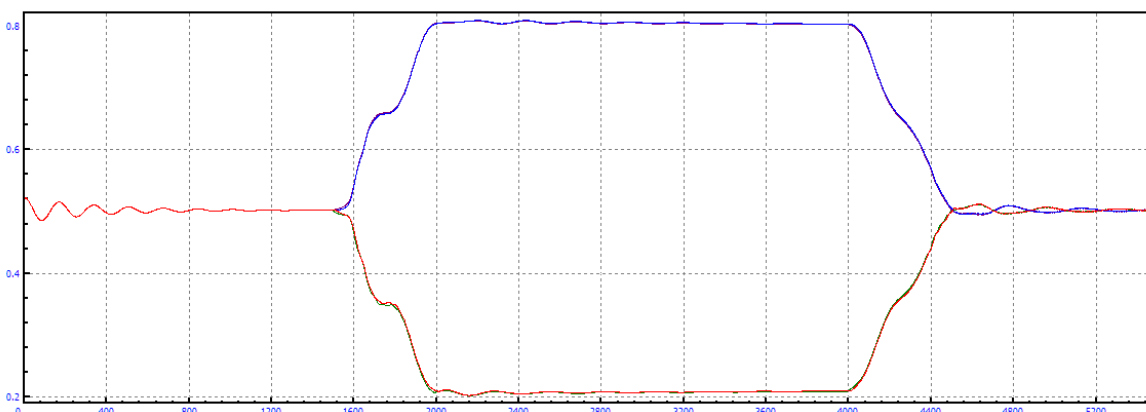


Figura A.227: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -80% y V=85m/s

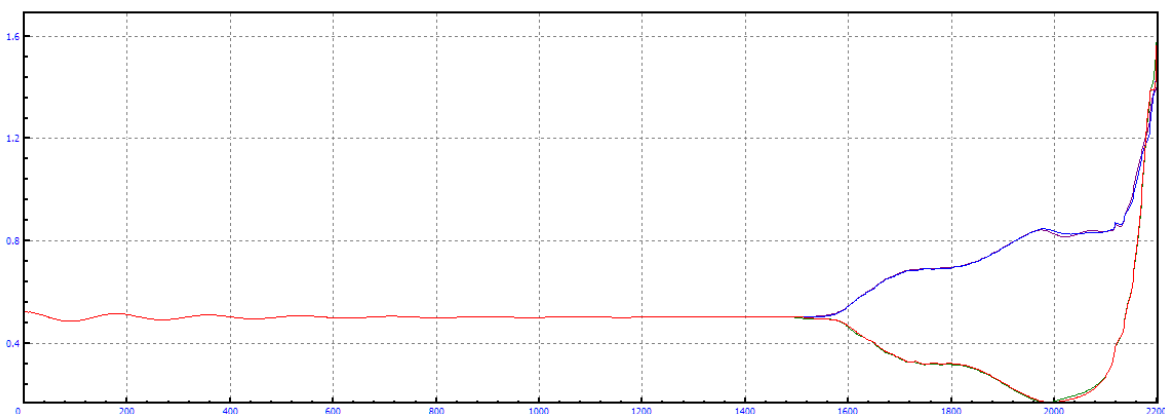


Figura A.228: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -80% y V=90m/s

B.2.2 MODIFICACIÓN=60%

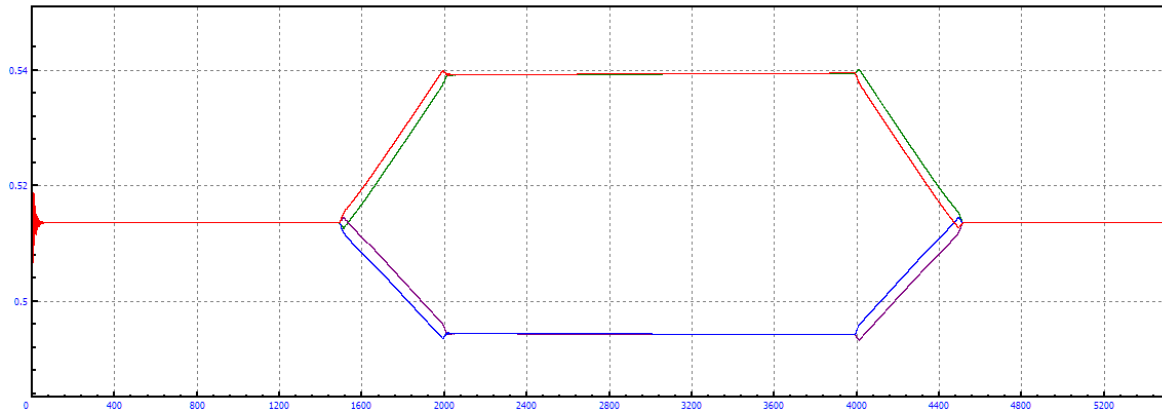


Figura A.229: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=5\text{m/s}$

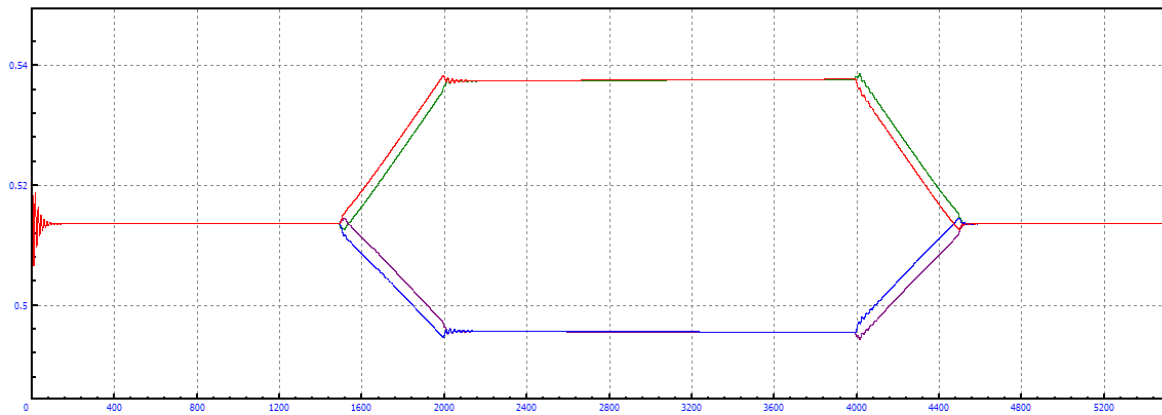


Figura A.230: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=10\text{m/s}$

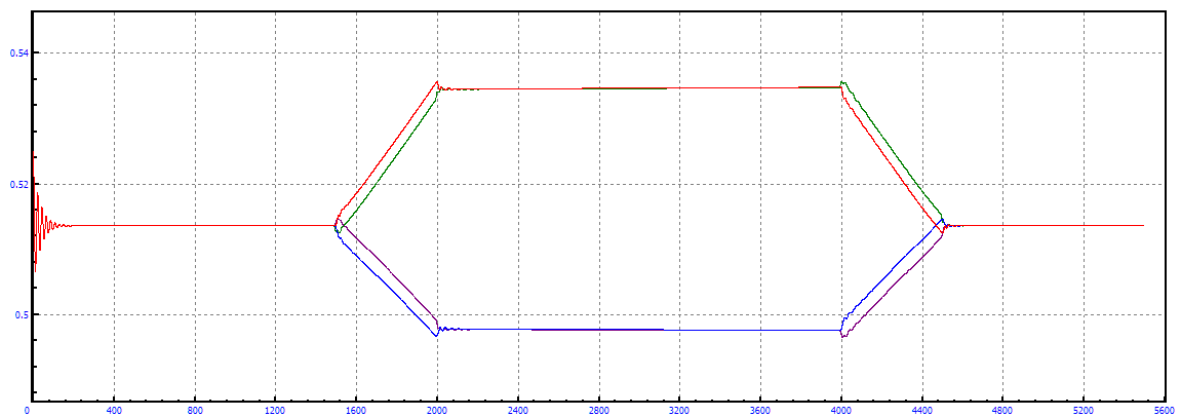


Figura A.231: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=15\text{m/s}$

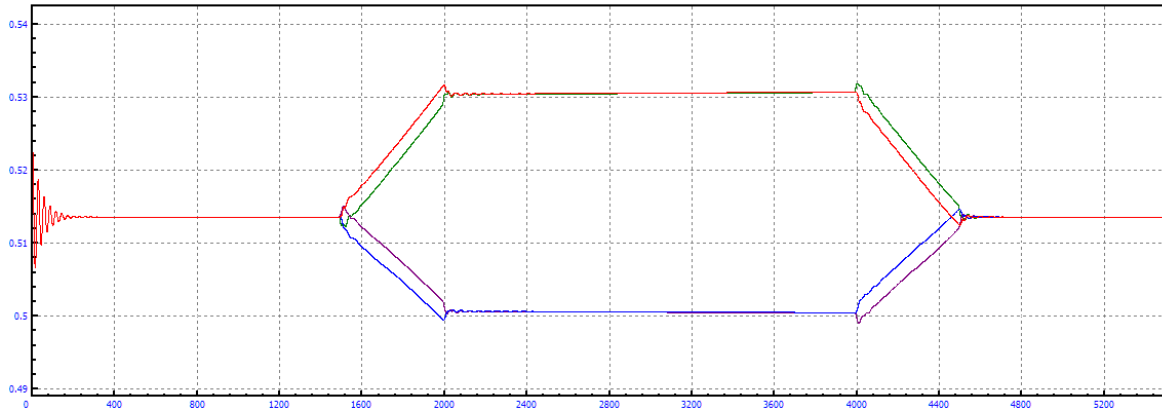


Figura A.232: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=20m/s

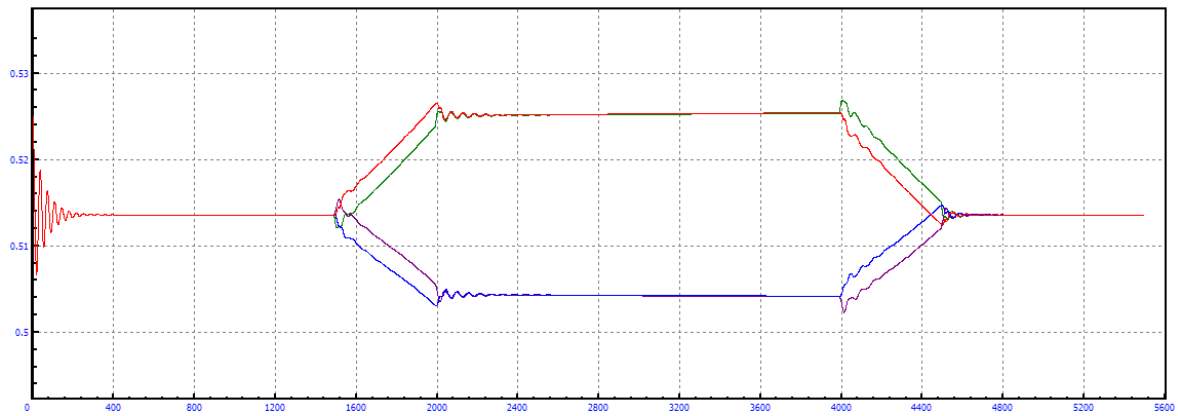


Figura A.233: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=25m/s

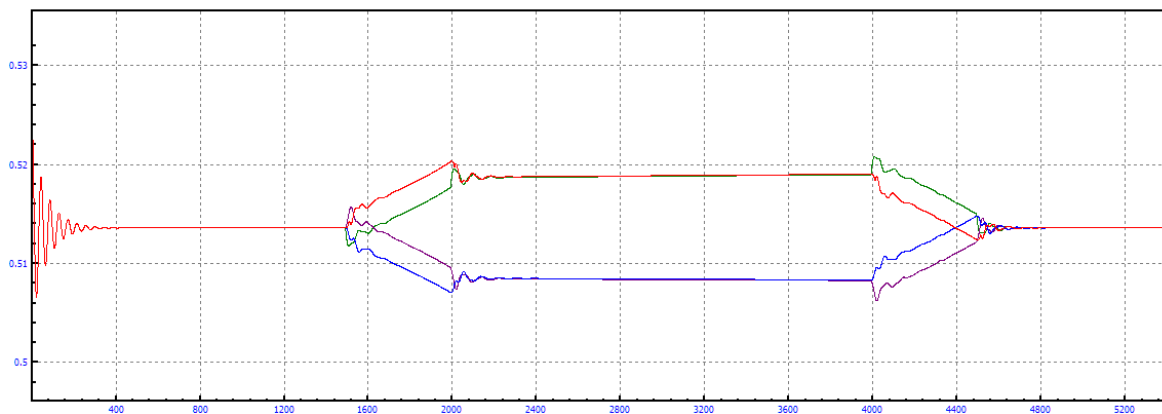


Figura A.234: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=30m/s

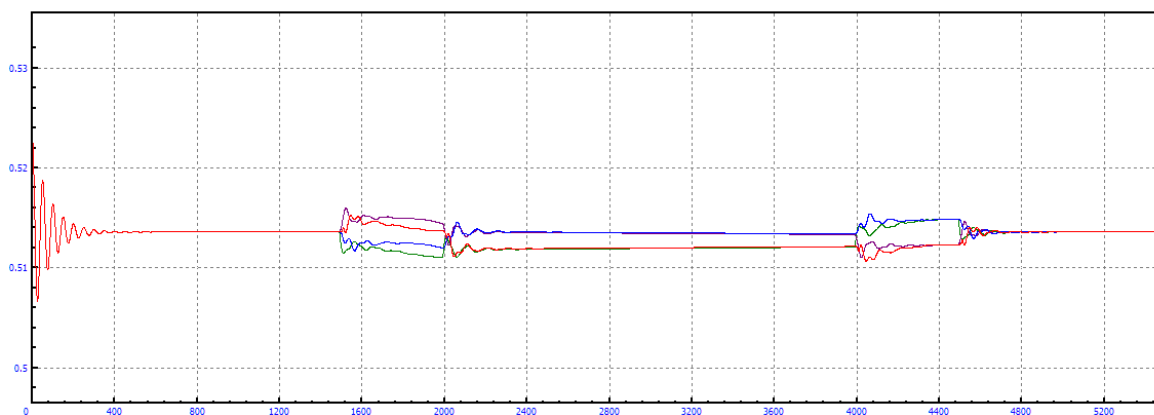


Figura A.235: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=35m/s

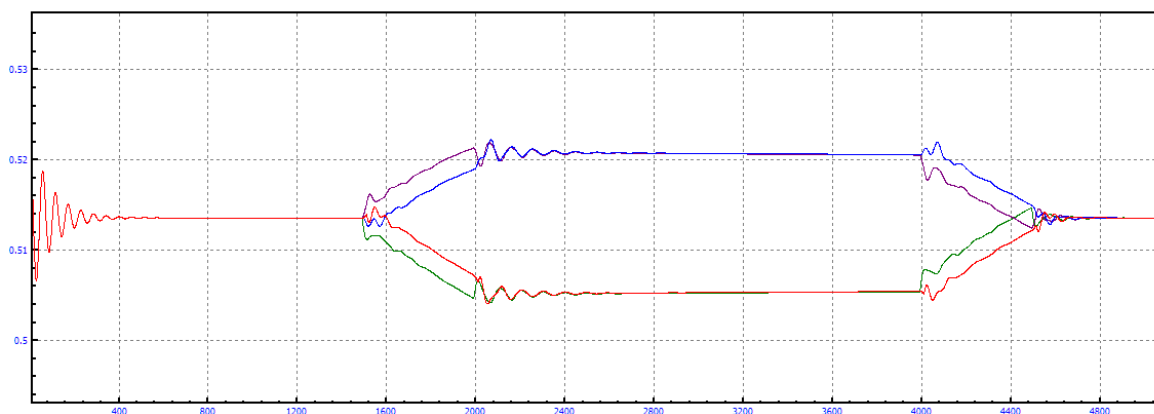


Figura A.236: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=40m/s

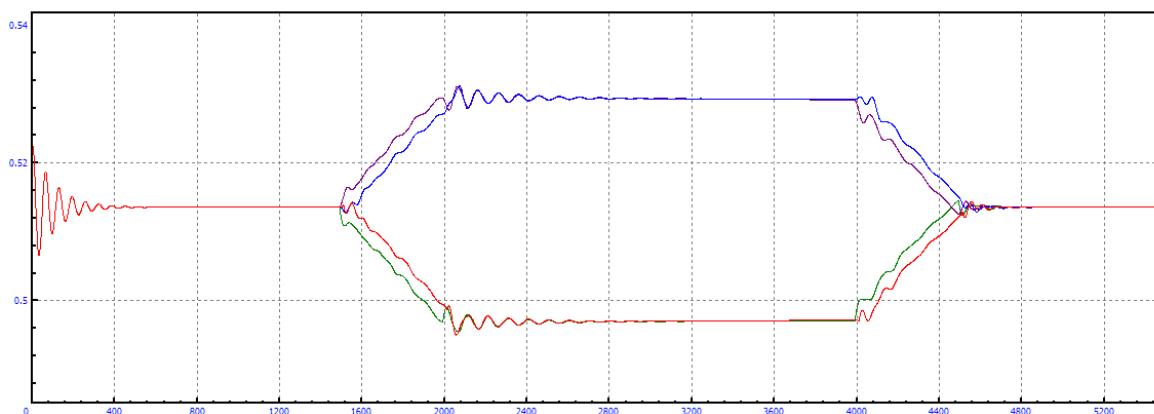


Figura A.237: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=45m/s

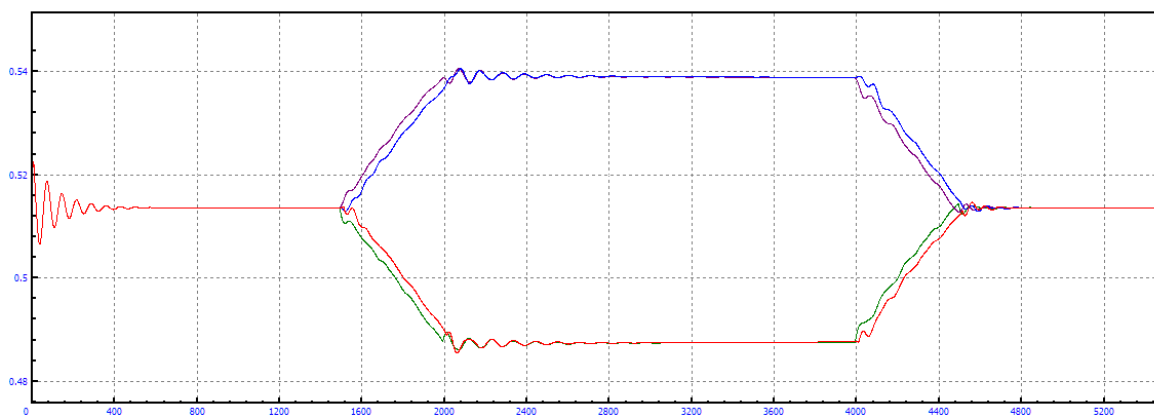


Figura A.238: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=50m/s

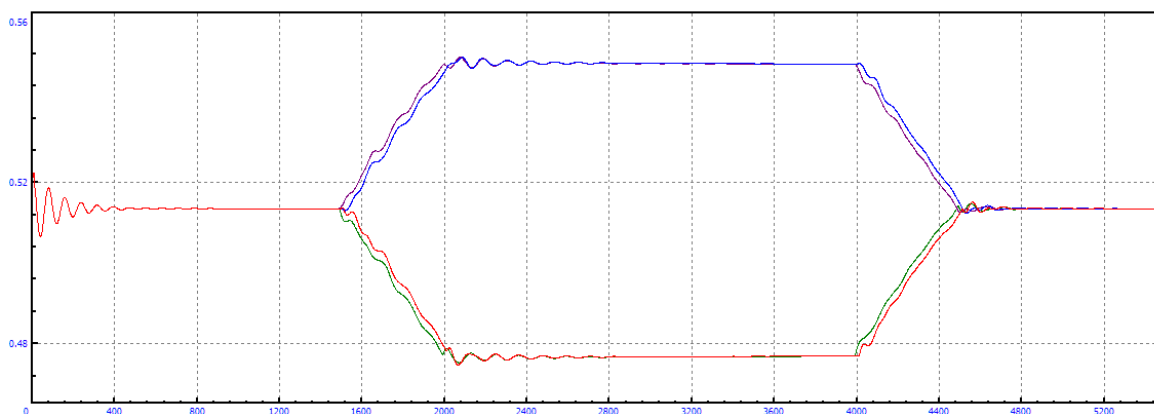


Figura A.239: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=55m/s

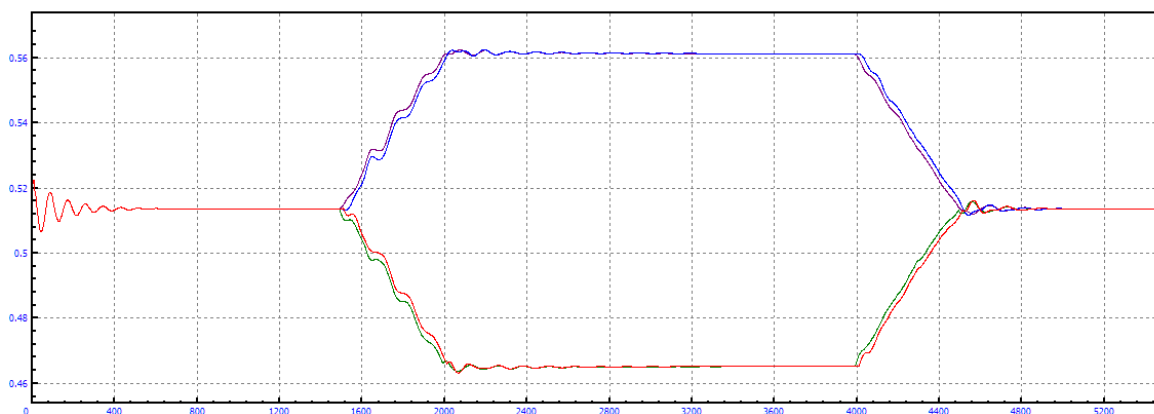


Figura A.240: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=60m/s

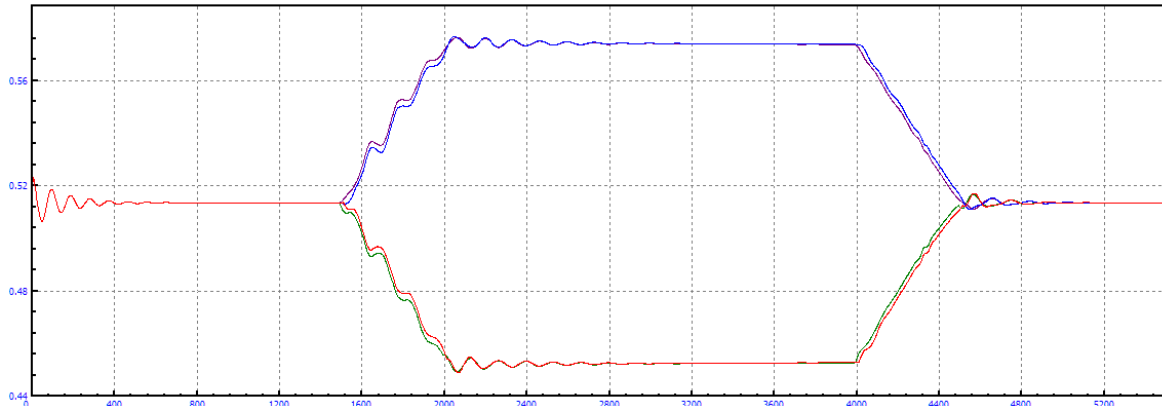


Figura A.241: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=65m/s

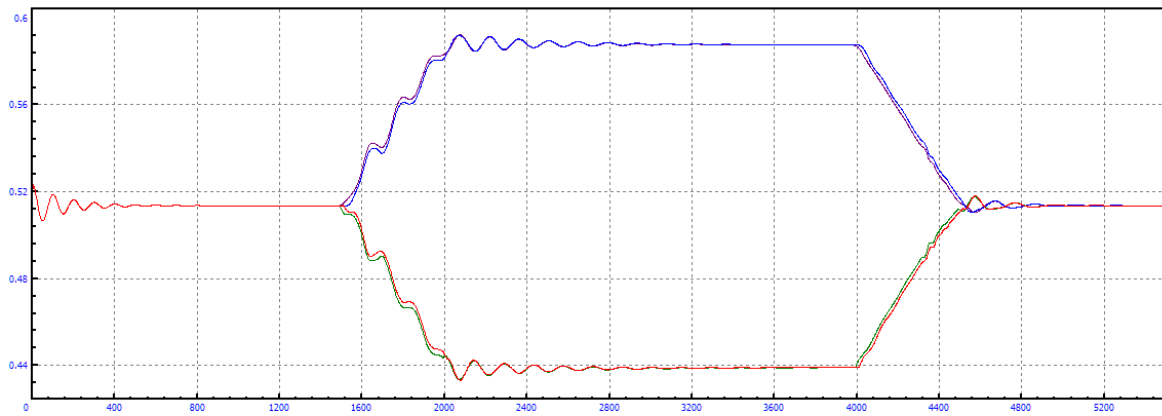


Figura A.242: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=70m/s

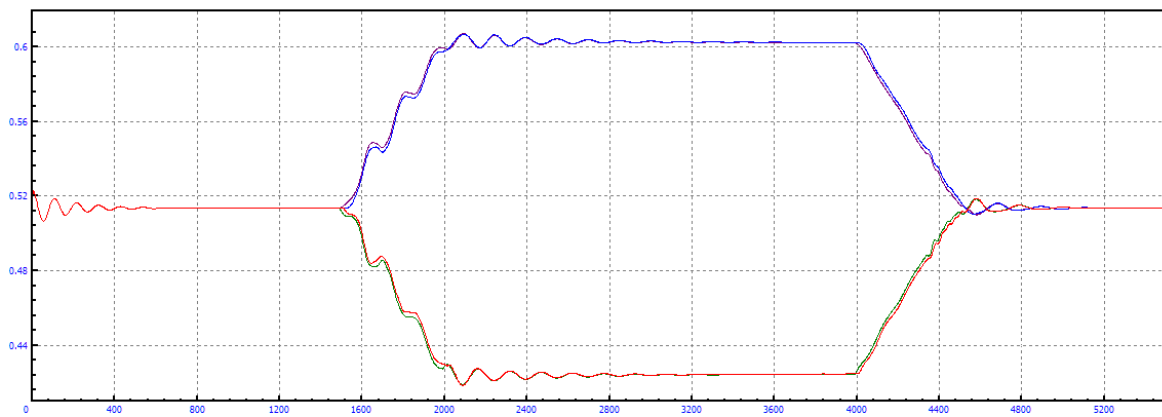


Figura A.243: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -60% y V=75m/s

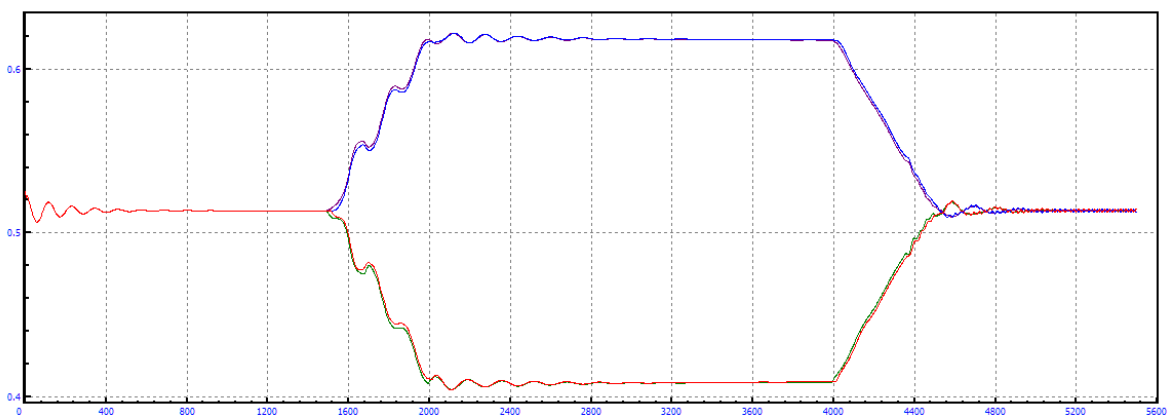


Figura A.244: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=80\text{m/s}$

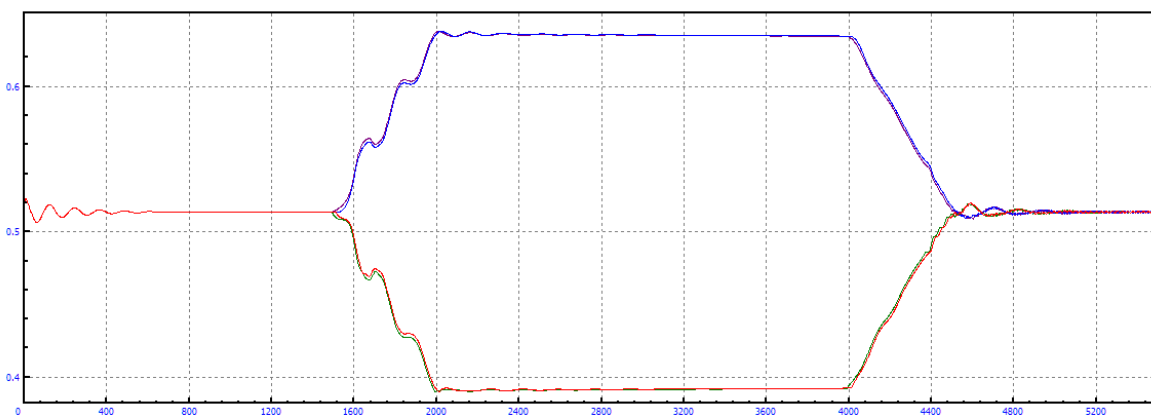


Figura A.245: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=85\text{m/s}$

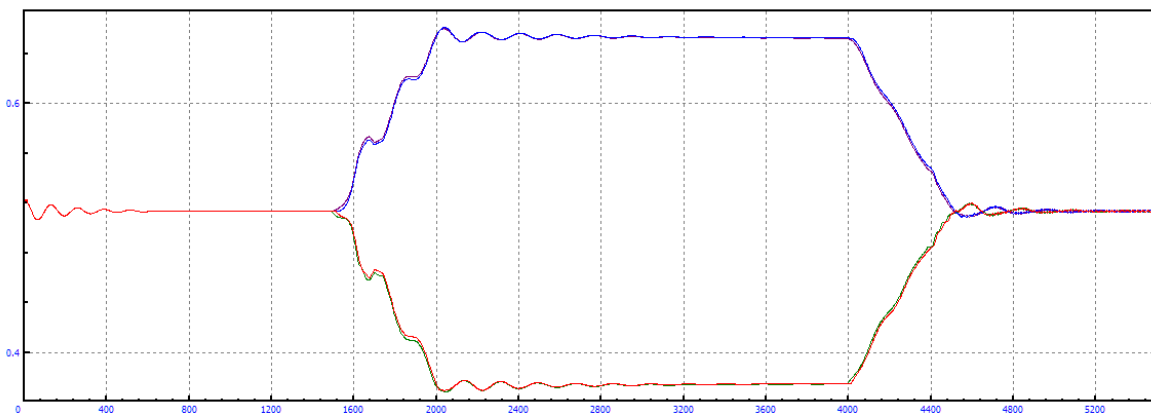


Figura A.246: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=90\text{m/s}$

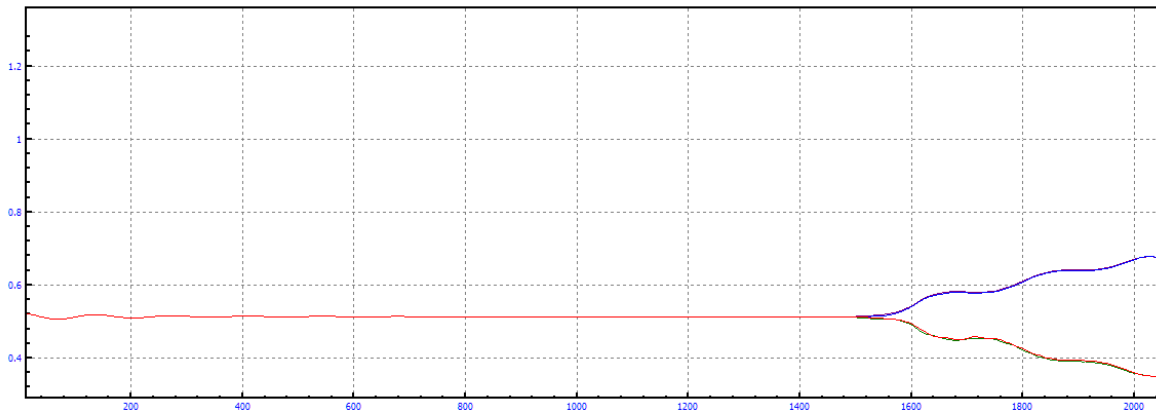


Figura A.247: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -60% y $V=95\text{m/s}$

B.2.3 MODIFICACIÓN=-40%

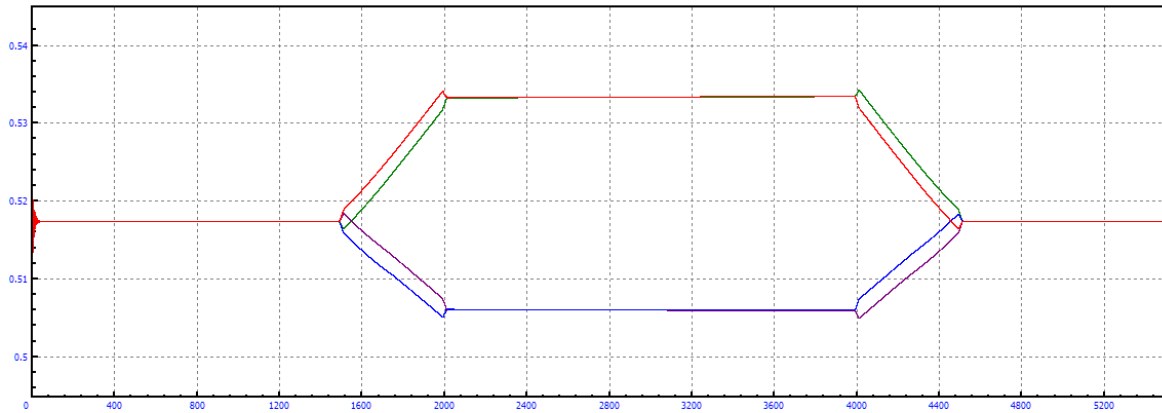


Figura A.248: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=5m/s

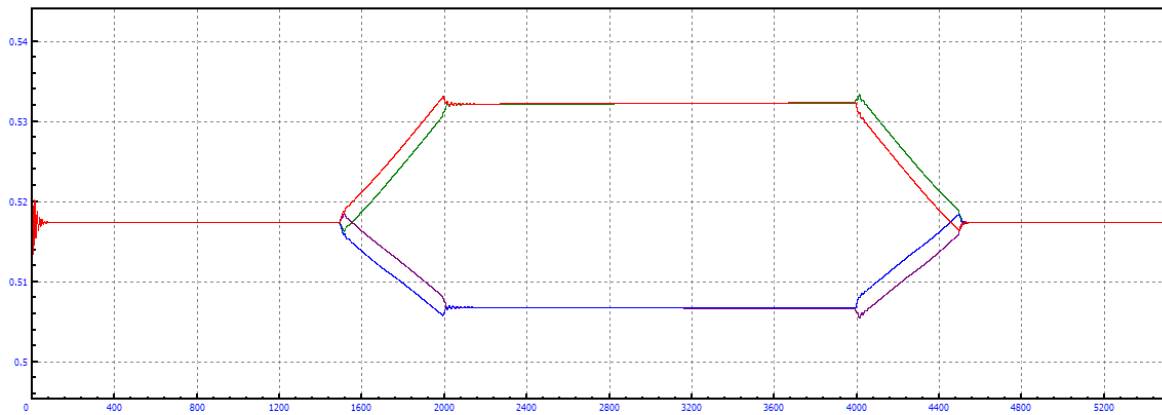


Figura A.249: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=10m/s

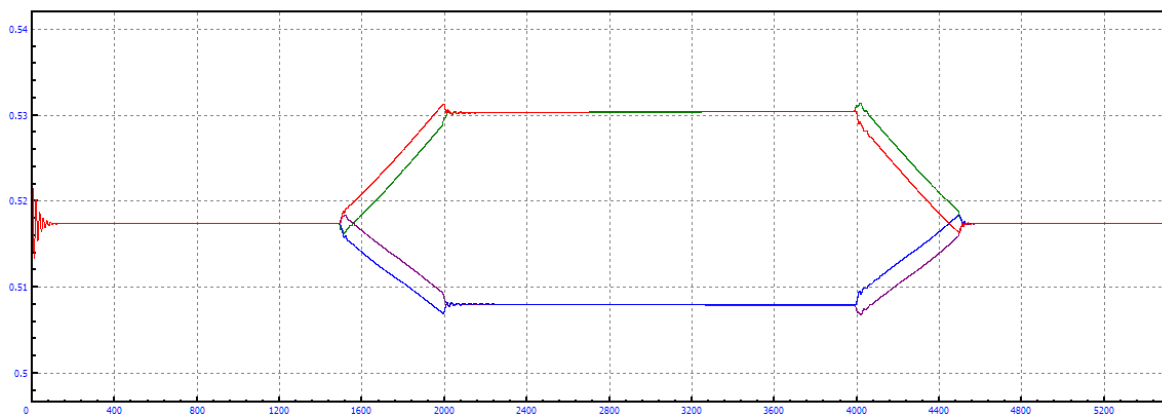


Figura A.250: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=15m/s

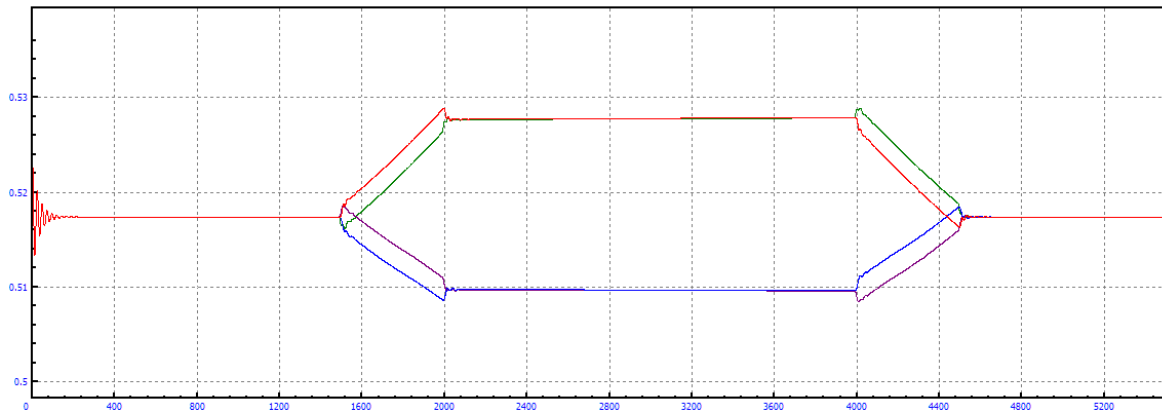


Figura A.251: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=20m/s

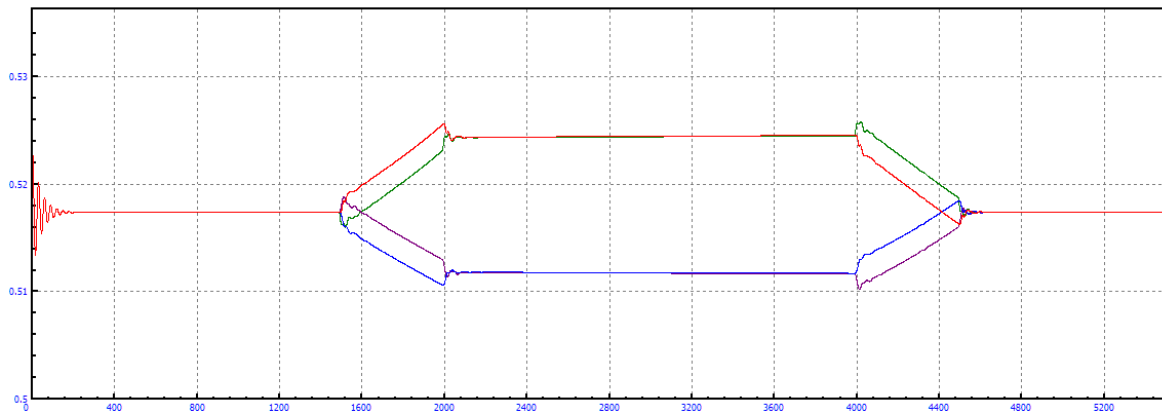


Figura A.252: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=25m/s

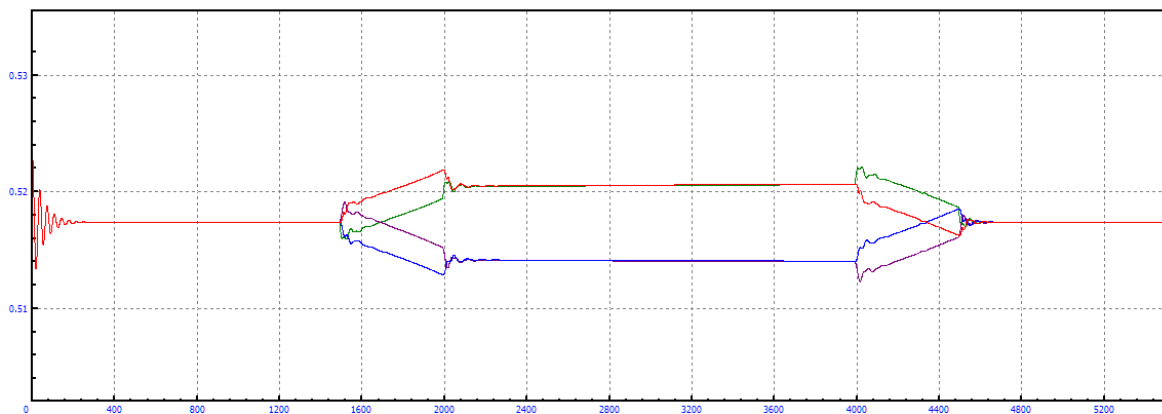


Figura A.253: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=30m/s

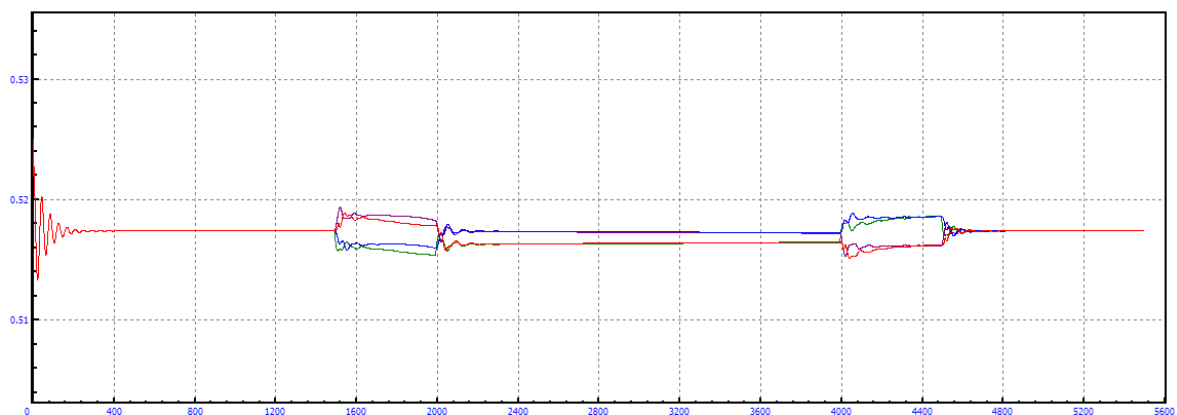


Figura A.254: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=35\text{m/s}$

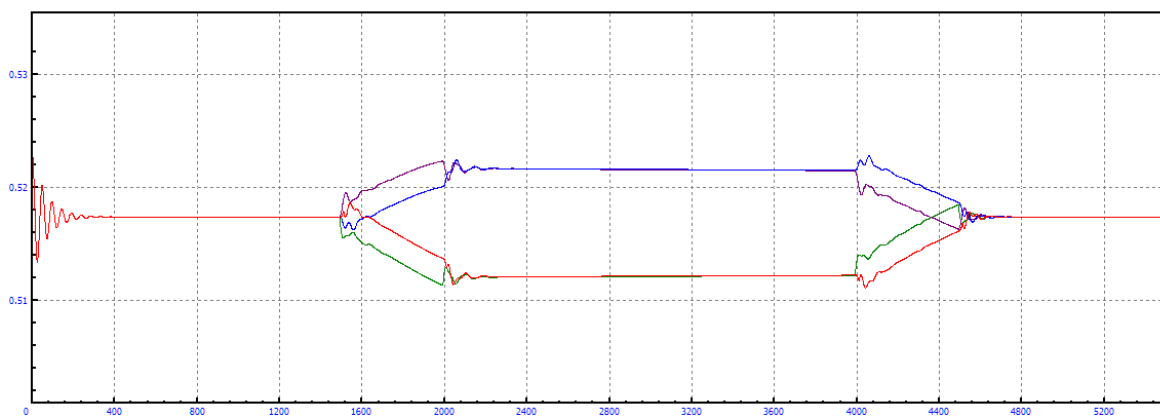


Figura A.255: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=40\text{m/s}$

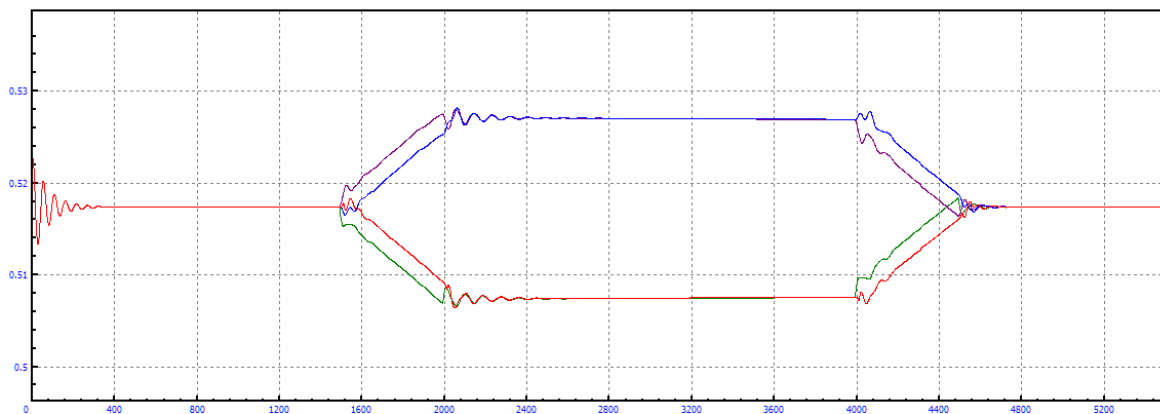


Figura A.256: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=45\text{m/s}$

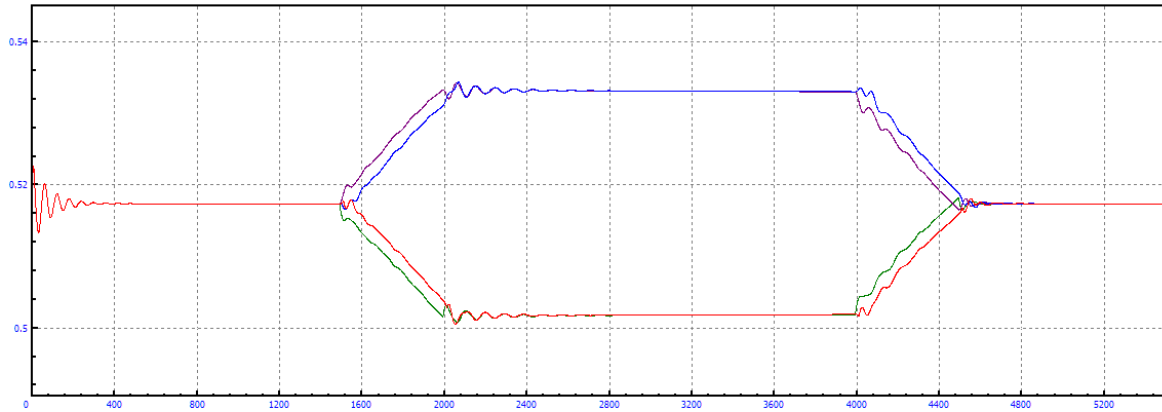


Figura A.257: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=50m/s

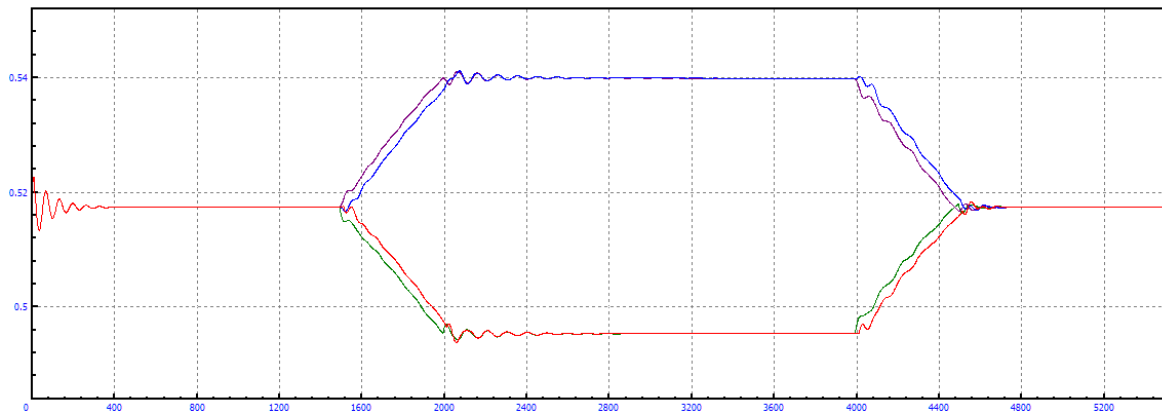


Figura A.258: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=55m/s

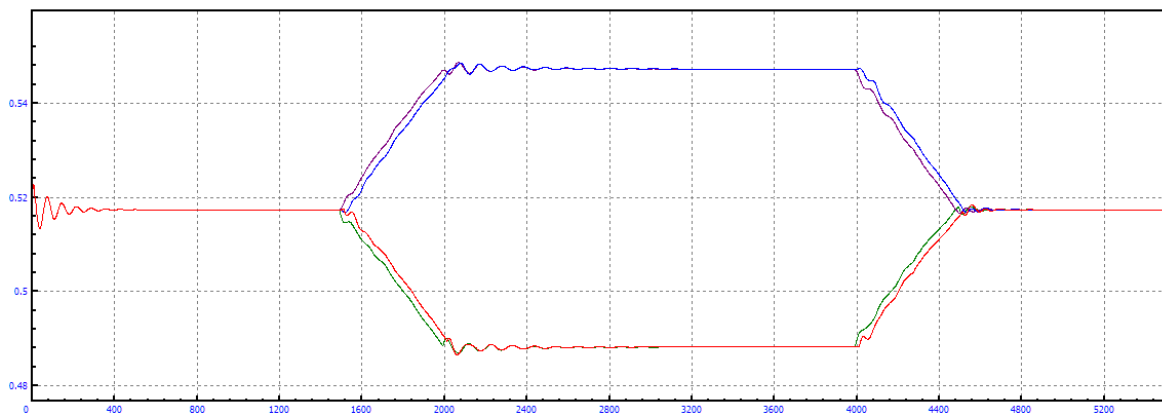


Figura A.259: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=60m/s

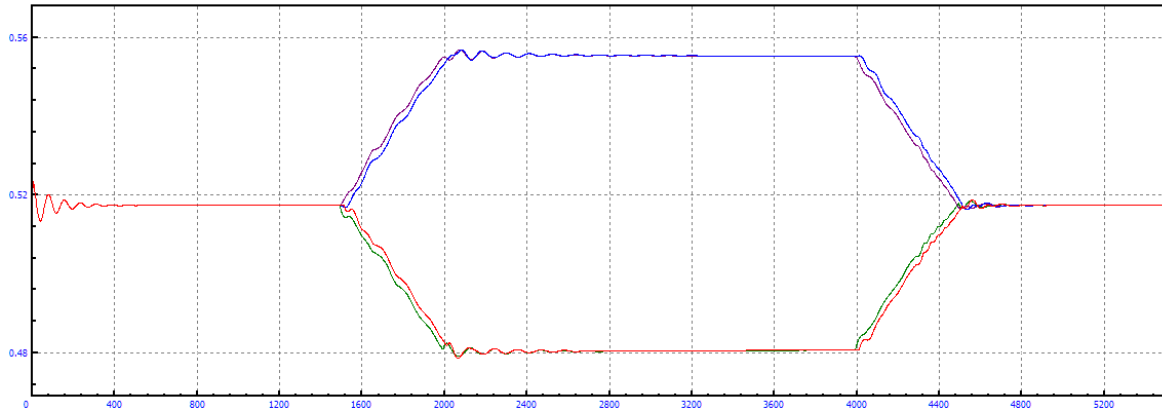


Figura A.260: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=65m/s

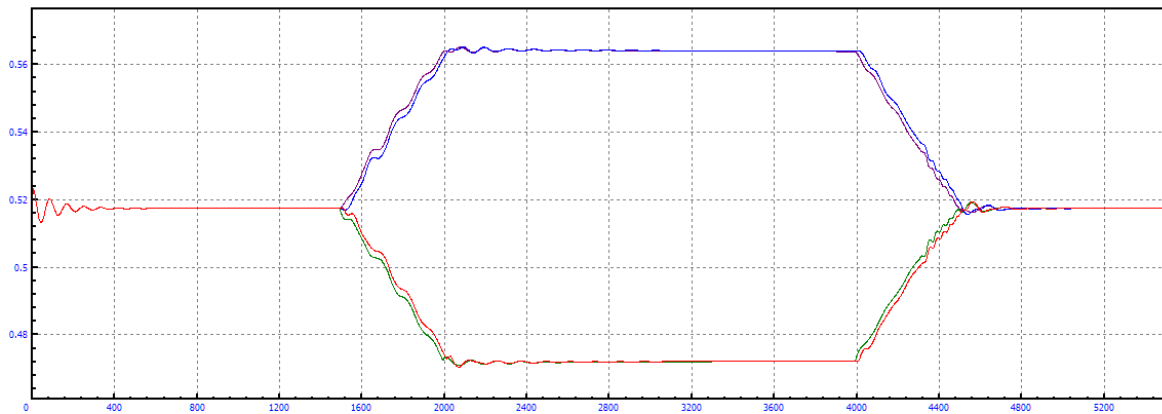


Figura A.261: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=70m/s

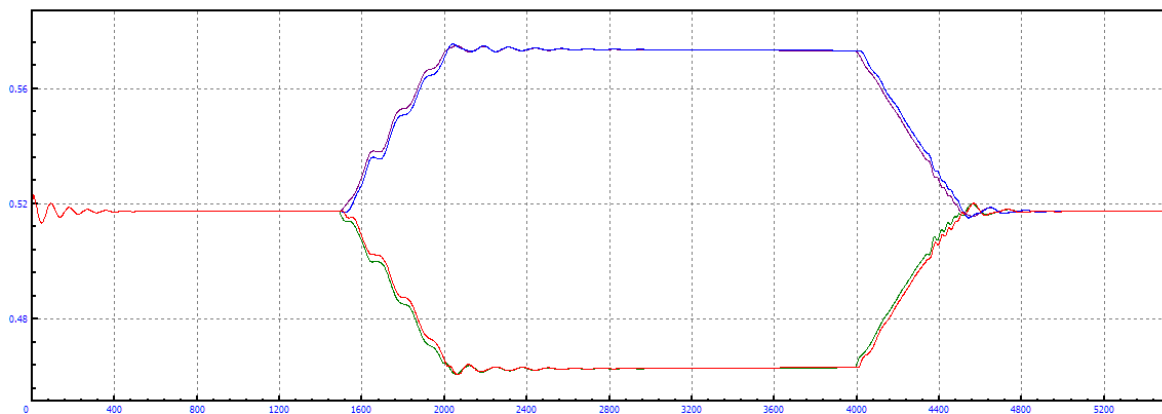


Figura A.262: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=75m/s

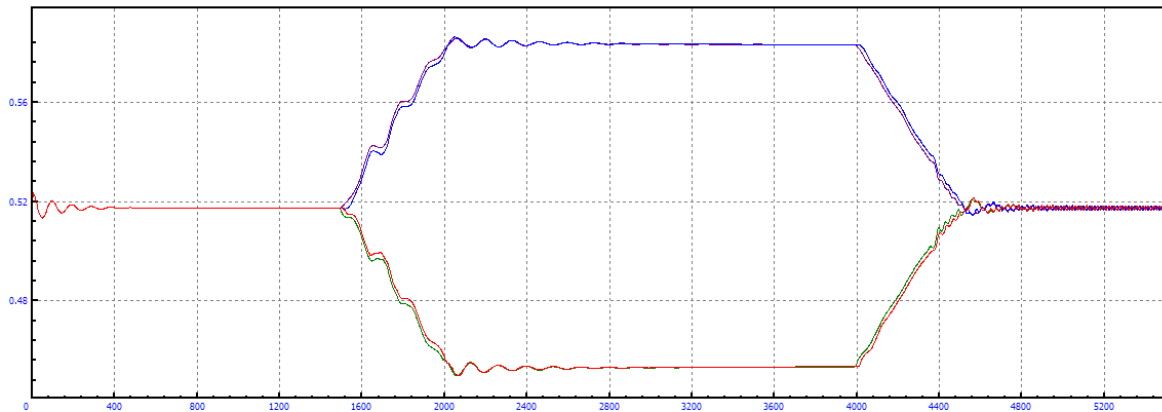


Figura A.263: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=80m/s

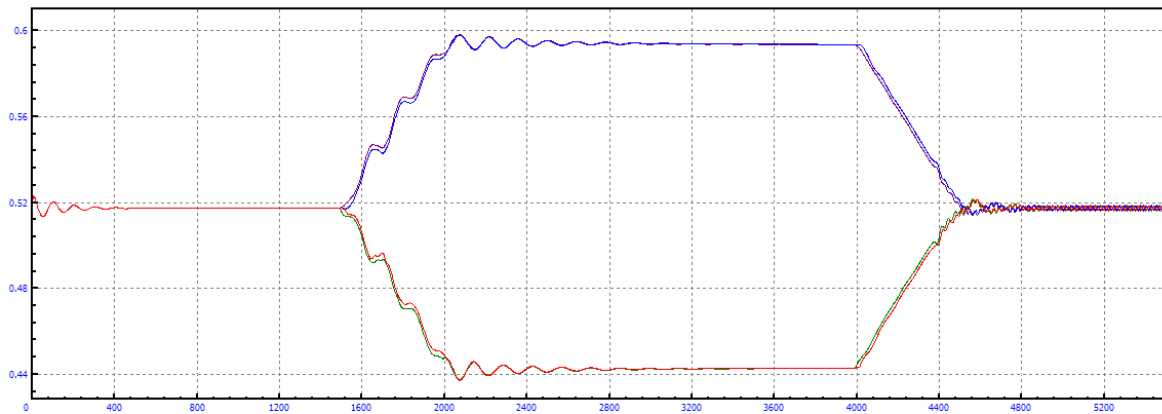


Figura A.264: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=85m/s

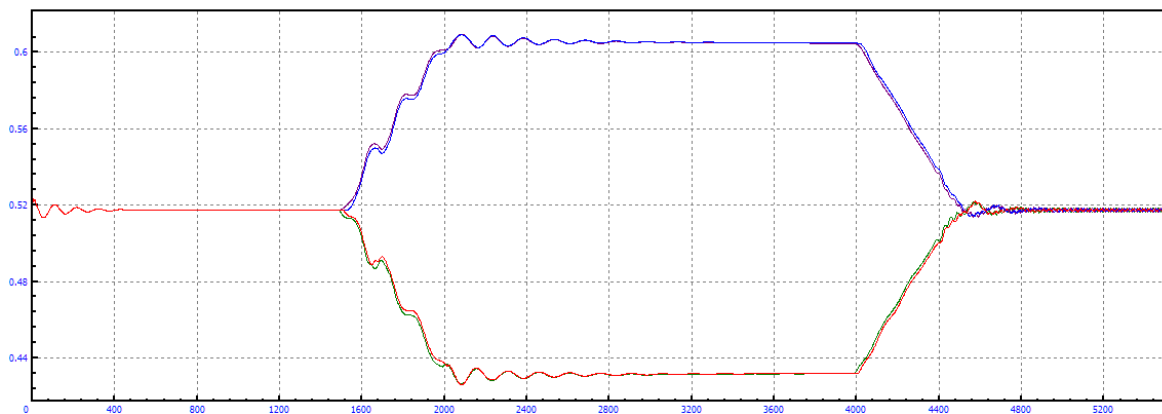


Figura A.265: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -40% y V=90m/s

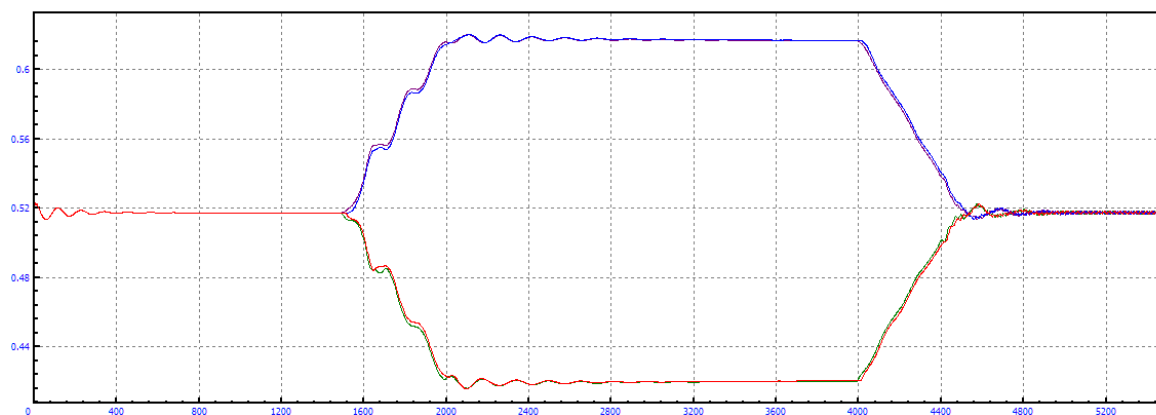


Figura A.266: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=95\text{m/s}$

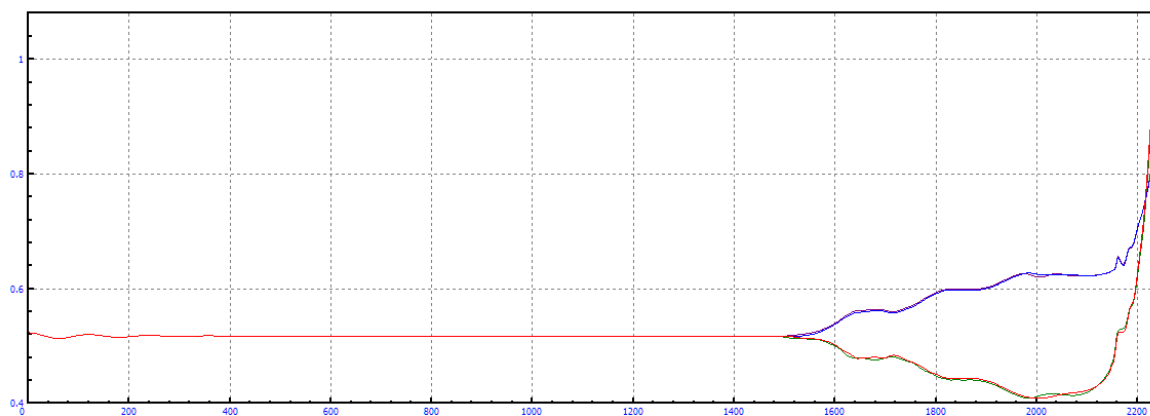


Figura A.267: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -40% y $V=100\text{m/s}$

B.2.4 MODIFICACIÓN=-20%

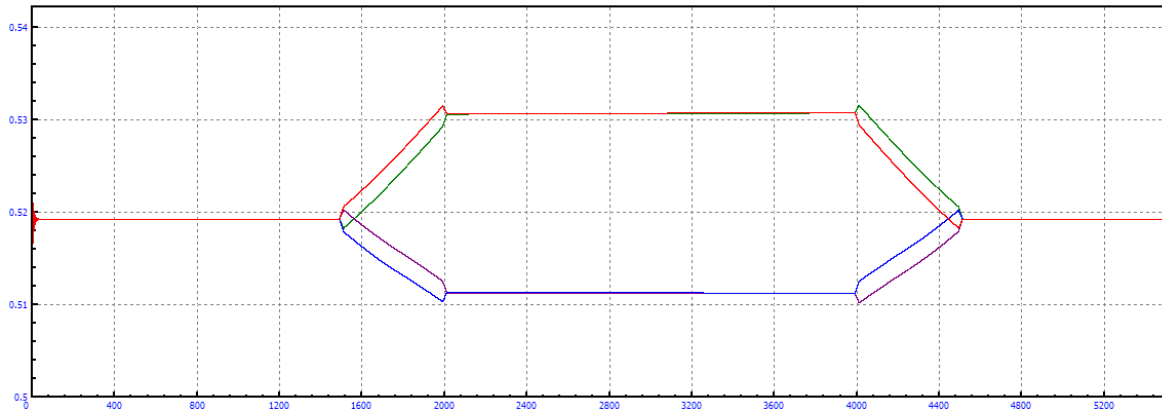


Figura A.268: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -20% y V=5m/s

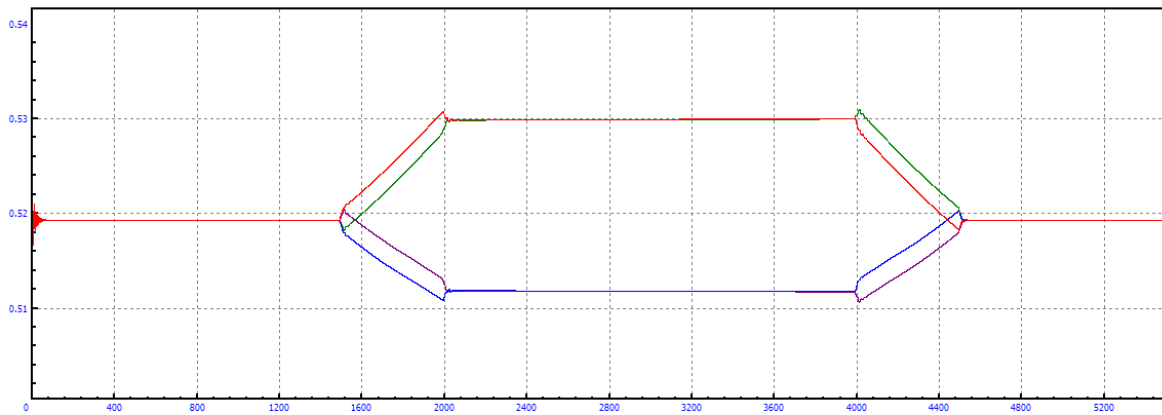


Figura A.269: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -20% y V=10m/s

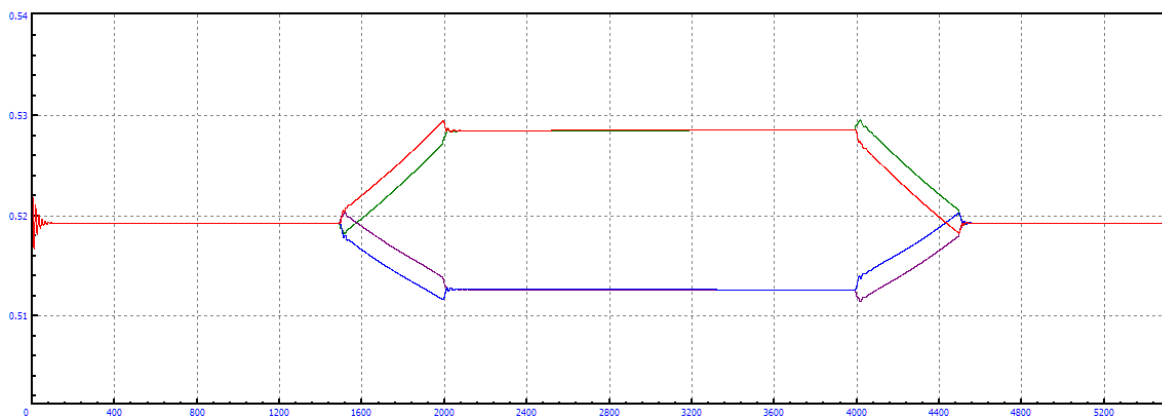


Figura A.270: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -20% y V=15m/s

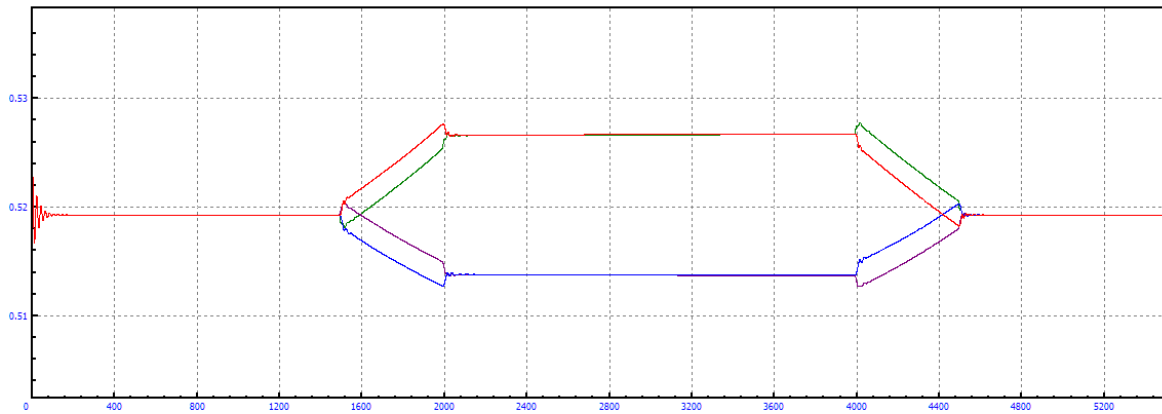


Figura A.271: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=20\text{m/s}$

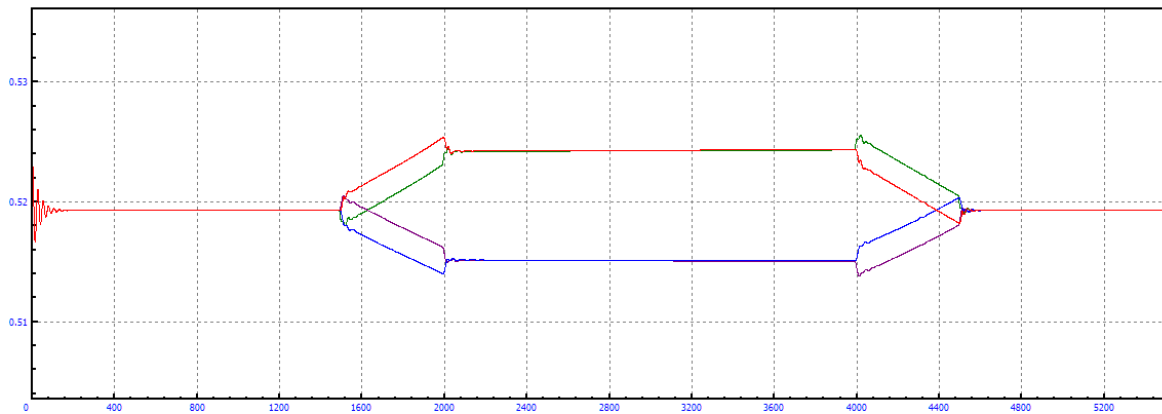


Figura A.272: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=25\text{m/s}$

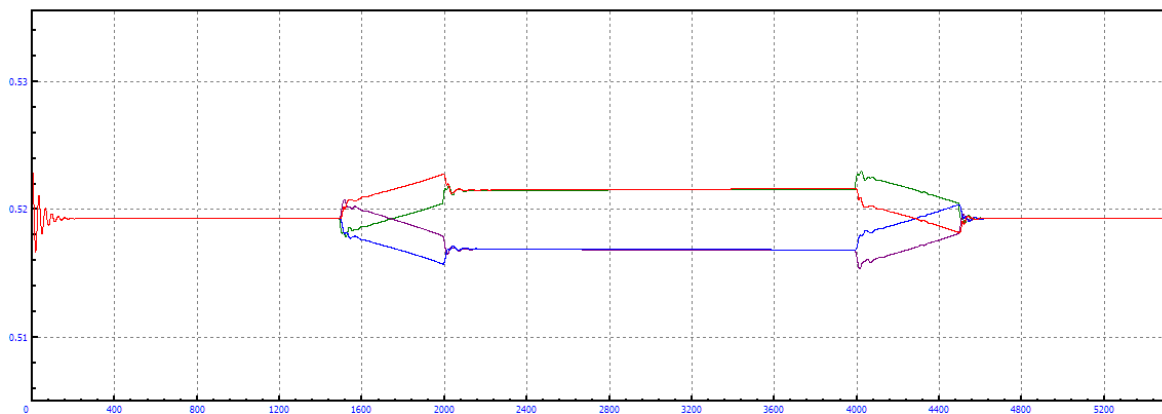


Figura A.273: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=30\text{m/s}$

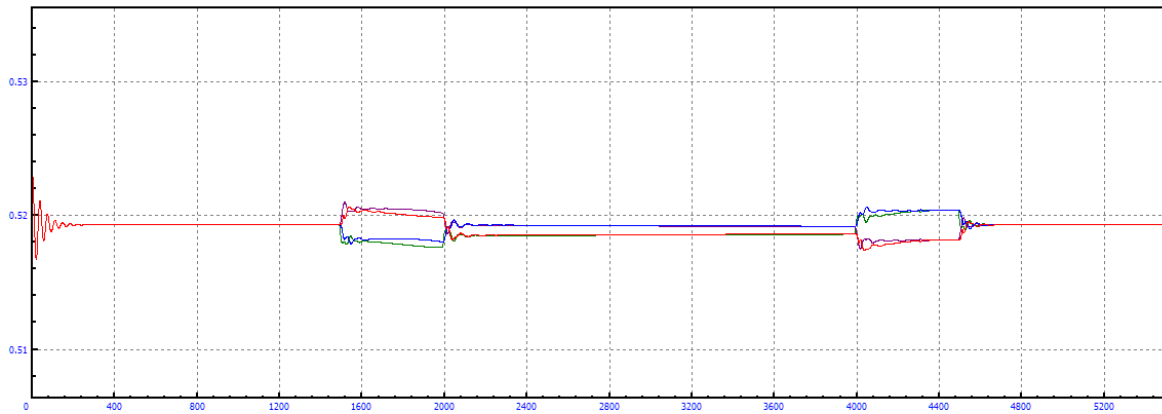


Figura A.274: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=35\text{m/s}$

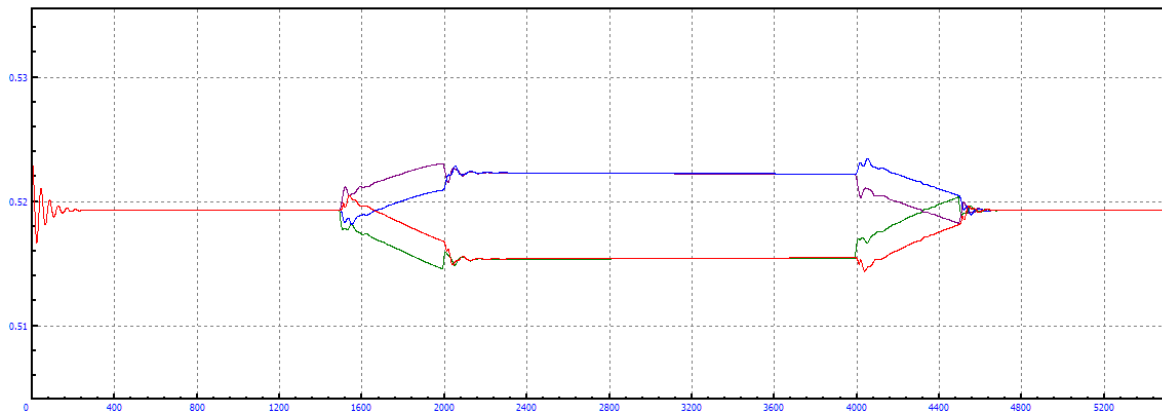


Figura A.275: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=40\text{m/s}$

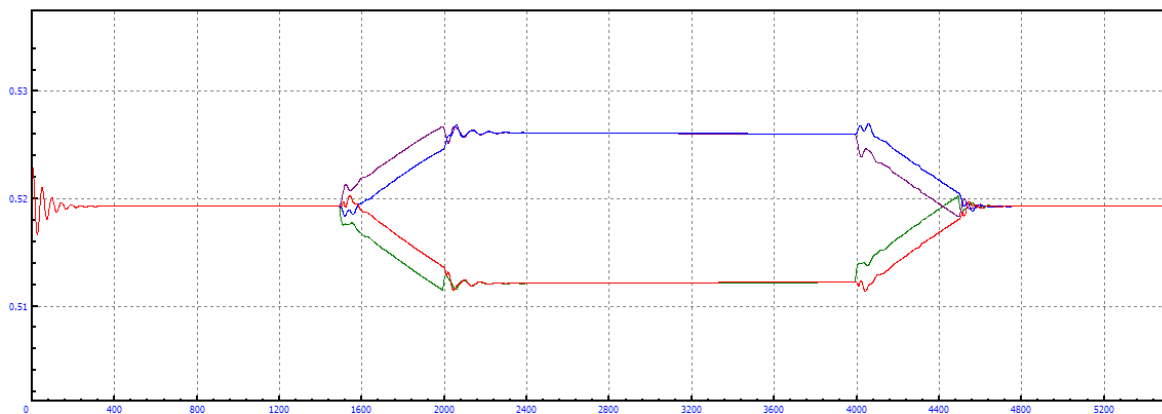


Figura A.276: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=45\text{m/s}$

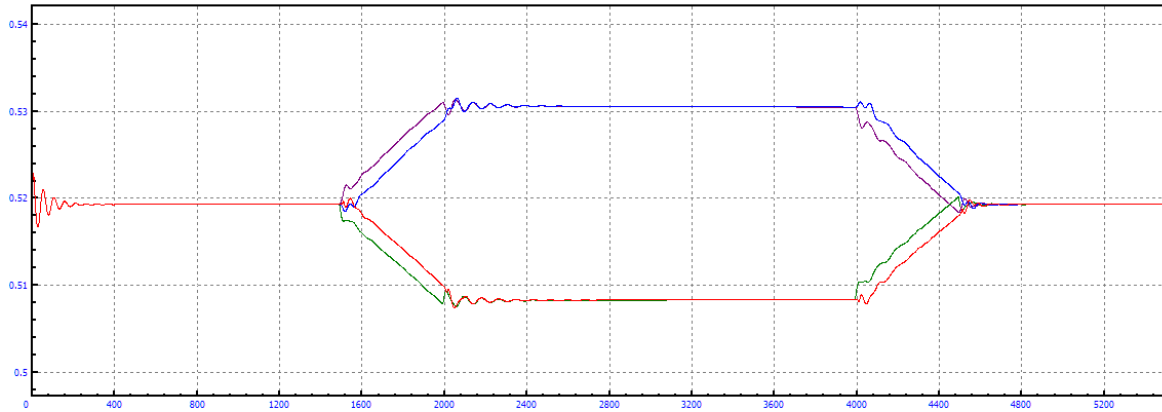


Figura A.277: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -20% y V=50m/s

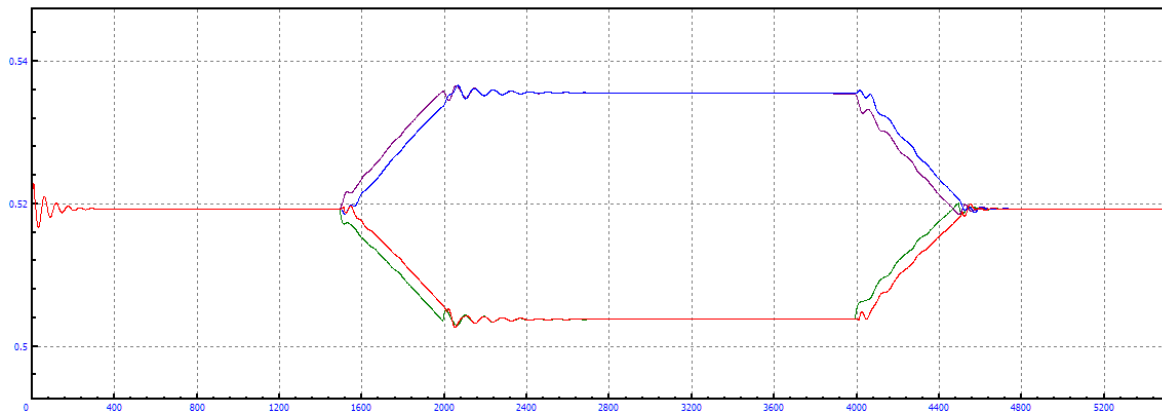


Figura A.278: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -20% y V=55m/s

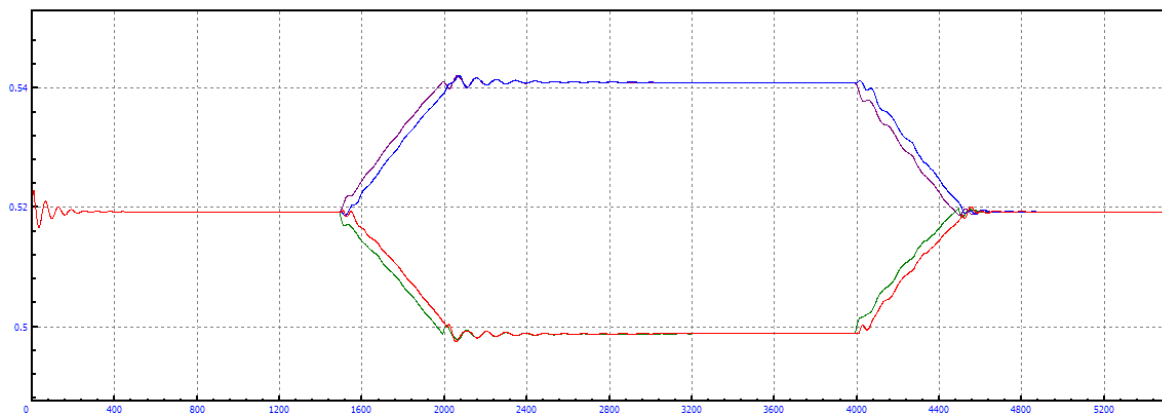


Figura A.279: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -20% y V=60m/s

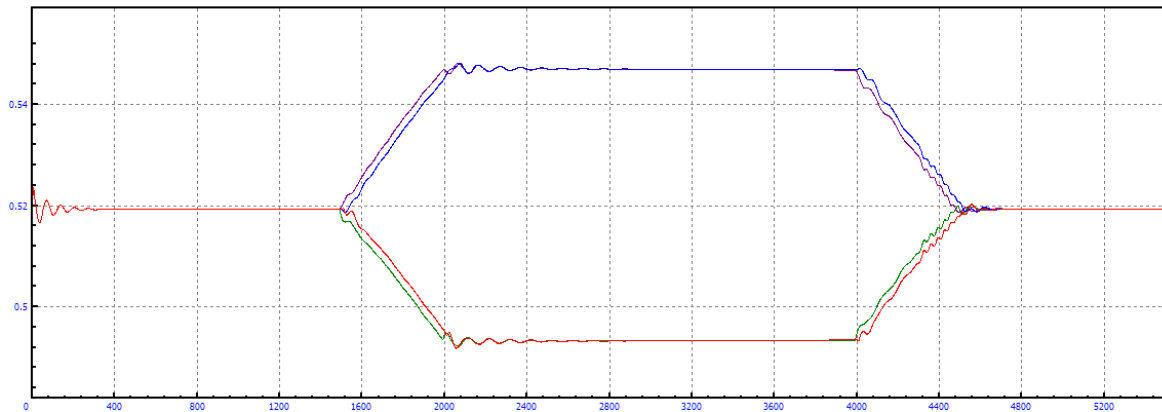


Figura A.280: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -20% y V=65m/s

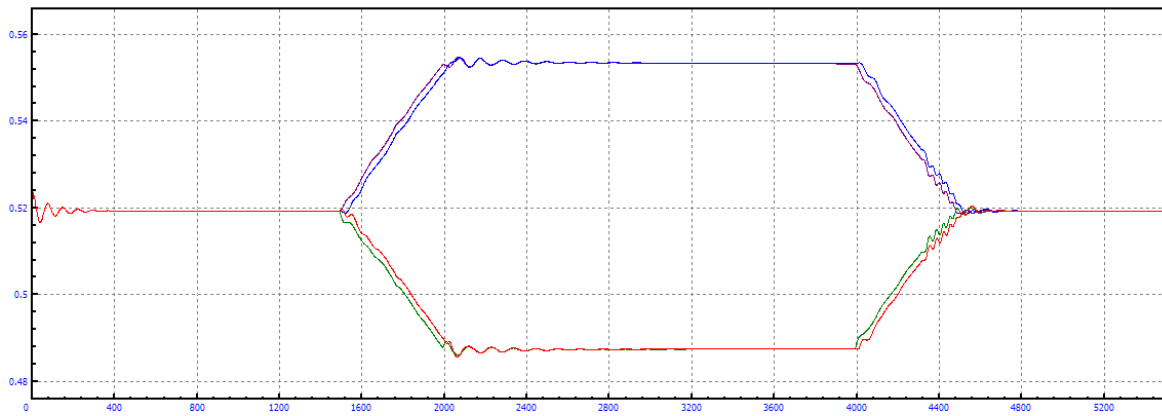


Figura A.281: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -20% y V=70m/s

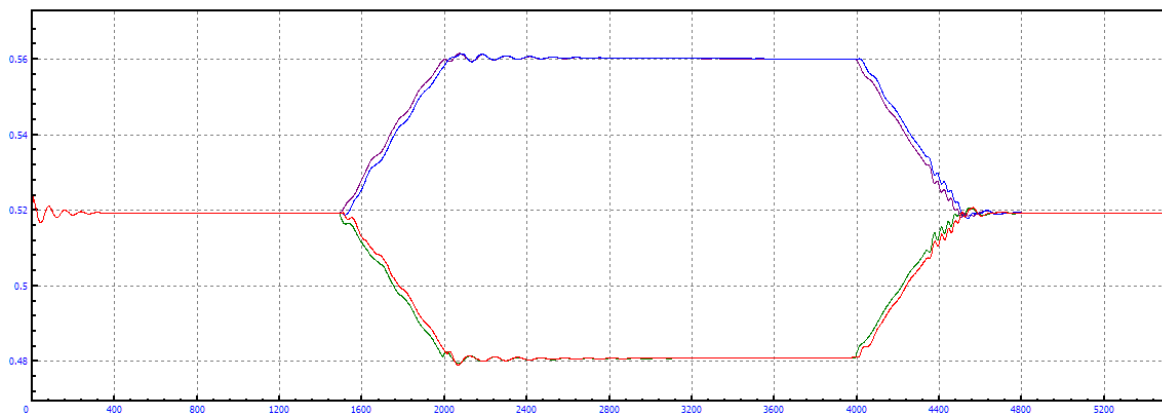


Figura A.282: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria= -20% y V=75m/s

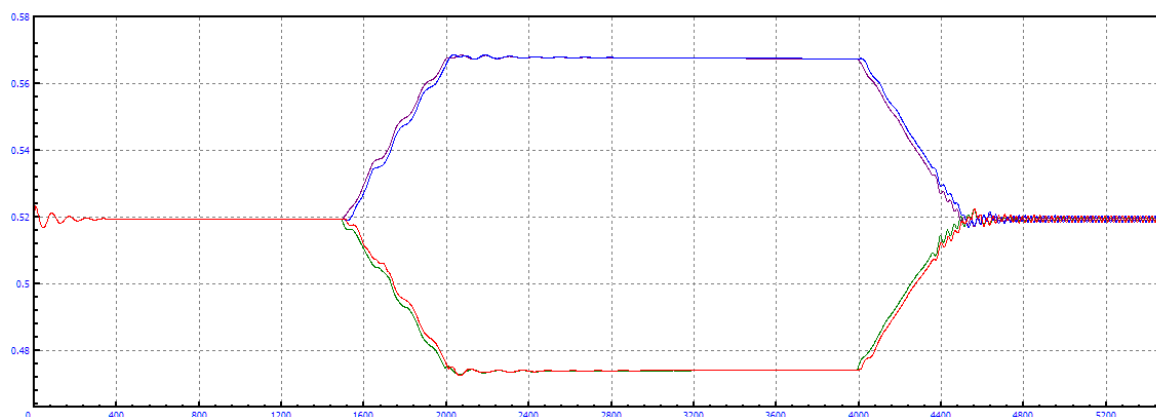


Figura A.283: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=80\text{m/s}$

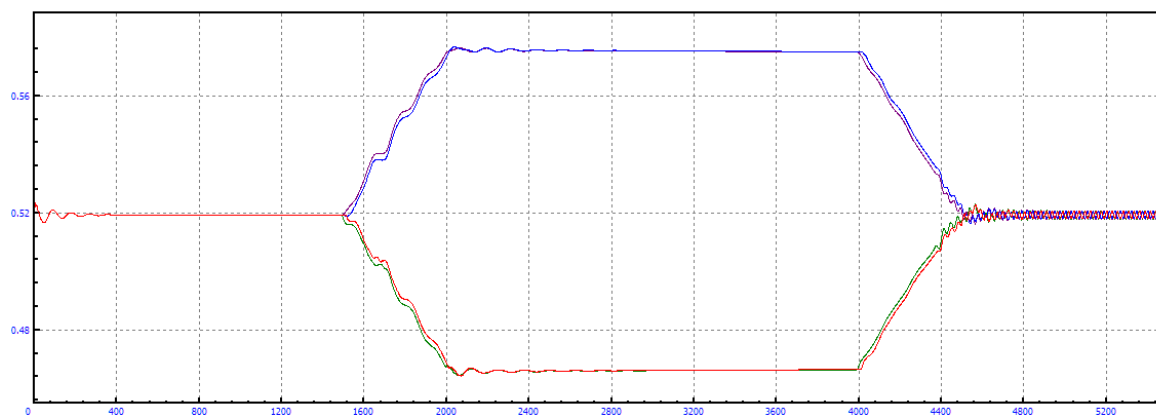


Figura A.284: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=85\text{m/s}$

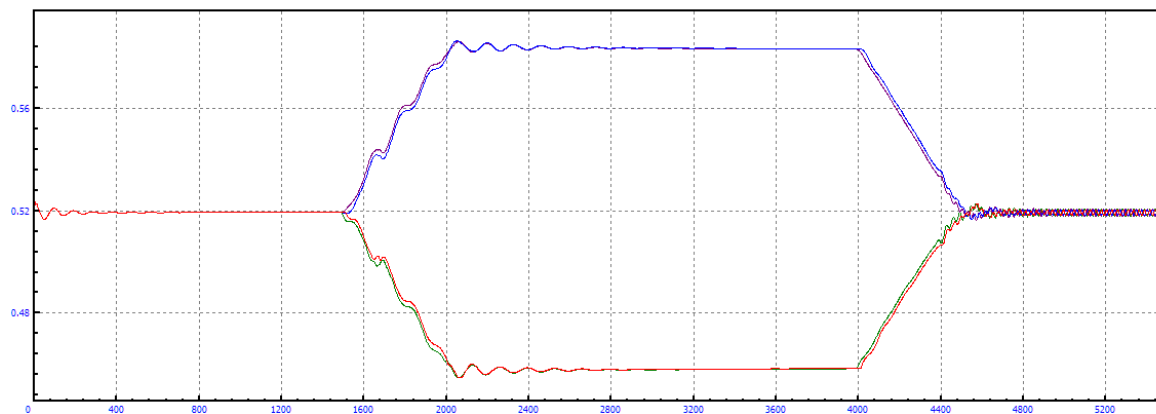


Figura A.285: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=90\text{m/s}$

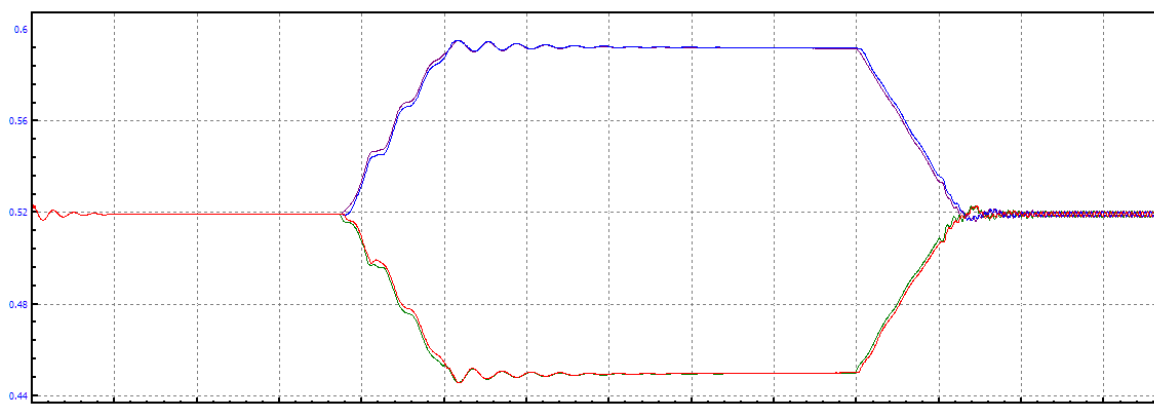


Figura A.286: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=95\text{m/s}$

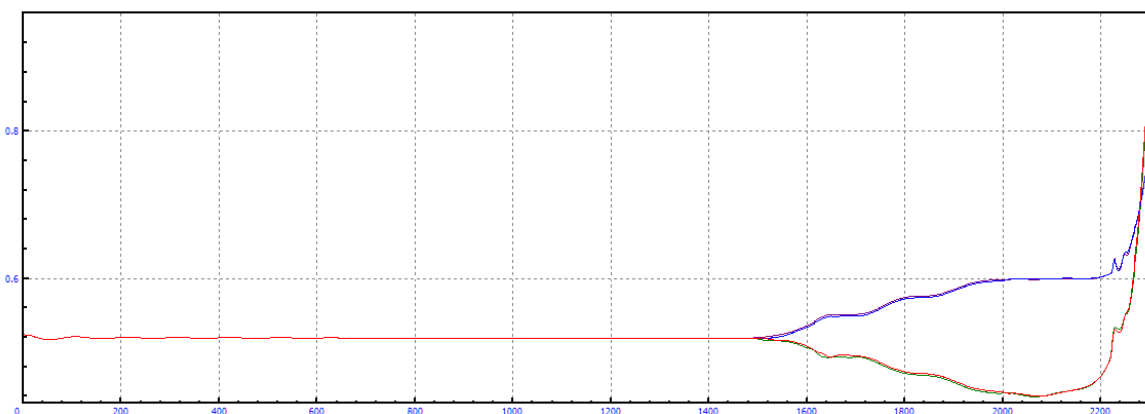


Figura A.287: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= -20% y $V=100\text{m/s}$

B.2.5 MODIFICACIÓN= 0% (POR DEFECTO)

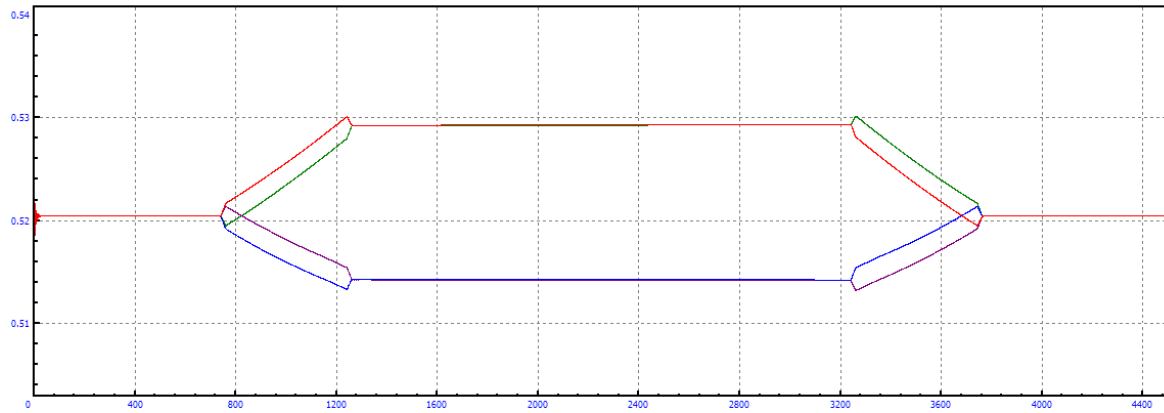


Figura A.288: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria=0% y V=5m/s

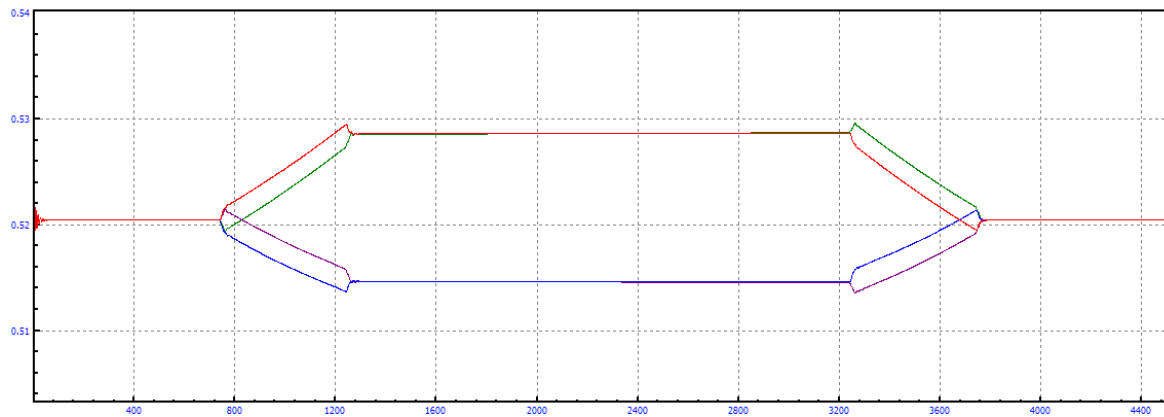


Figura A.289: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria=0% y V=10m/s

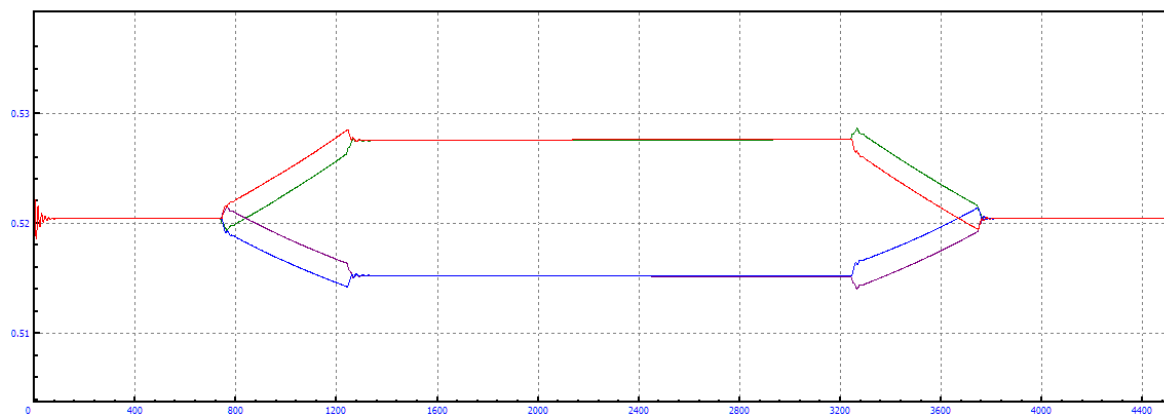


Figura A.290: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria=0% y V=15m/s

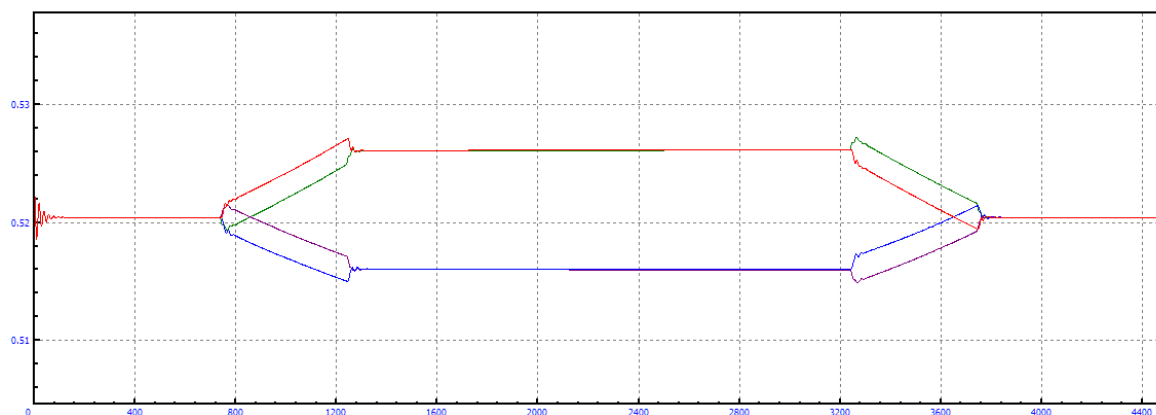


Figura A.291: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=20\text{m/s}$

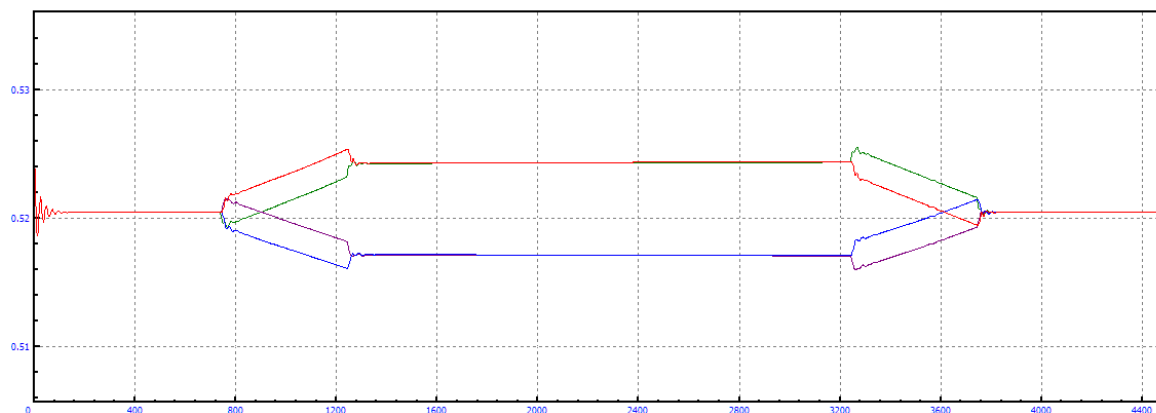


Figura A.292: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=25\text{m/s}$

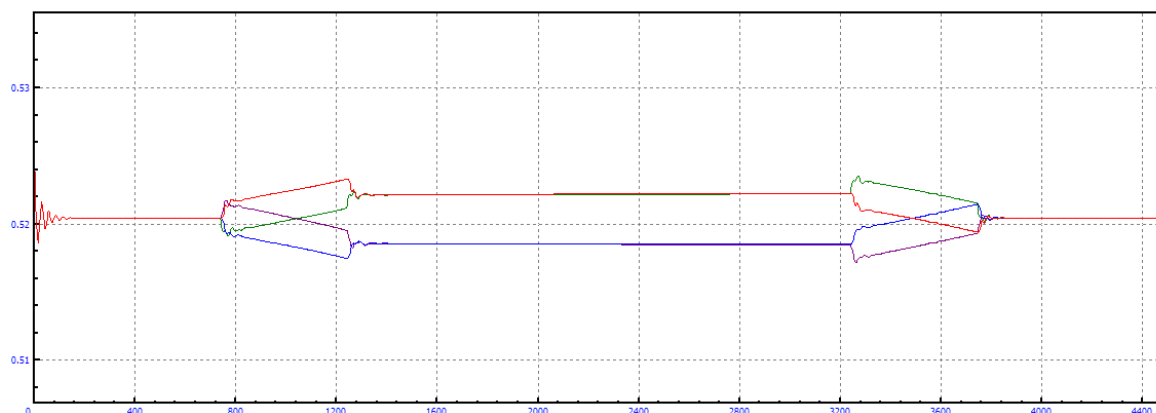


Figura A.293: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=30\text{m/s}$

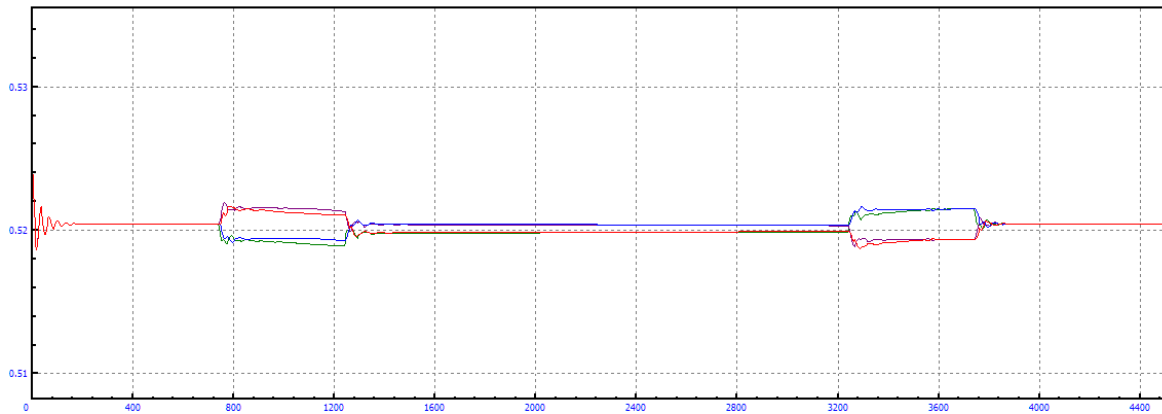


Figura A.294: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=35\text{m/s}$

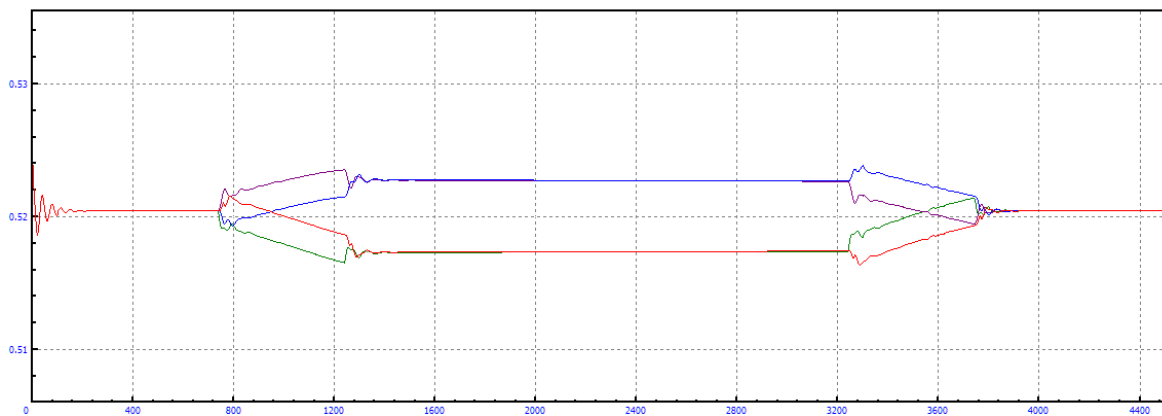


Figura A.295: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=40\text{m/s}$

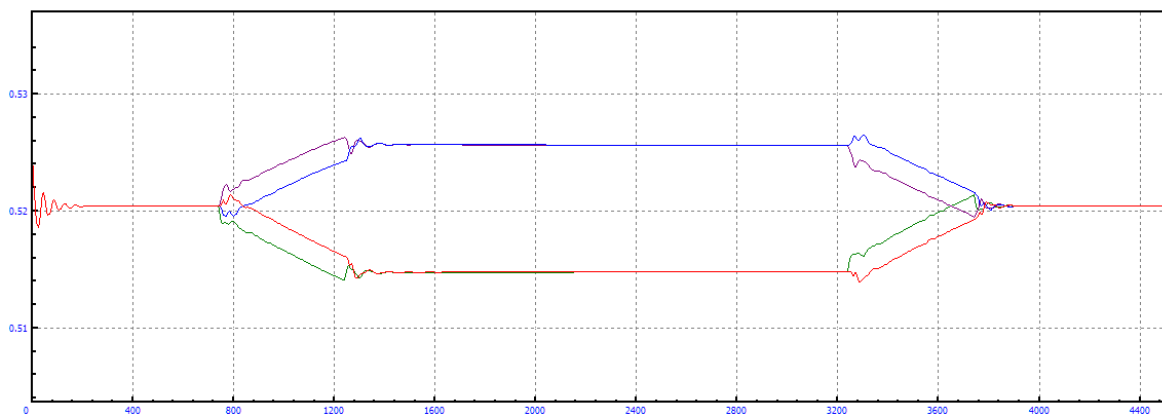


Figura A.296: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=45\text{m/s}$

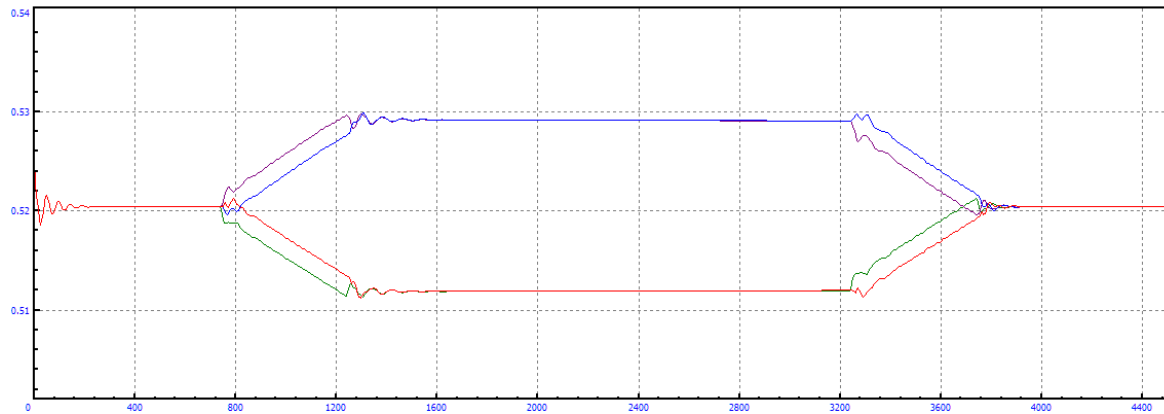


Figura A.297: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=50\text{m/s}$

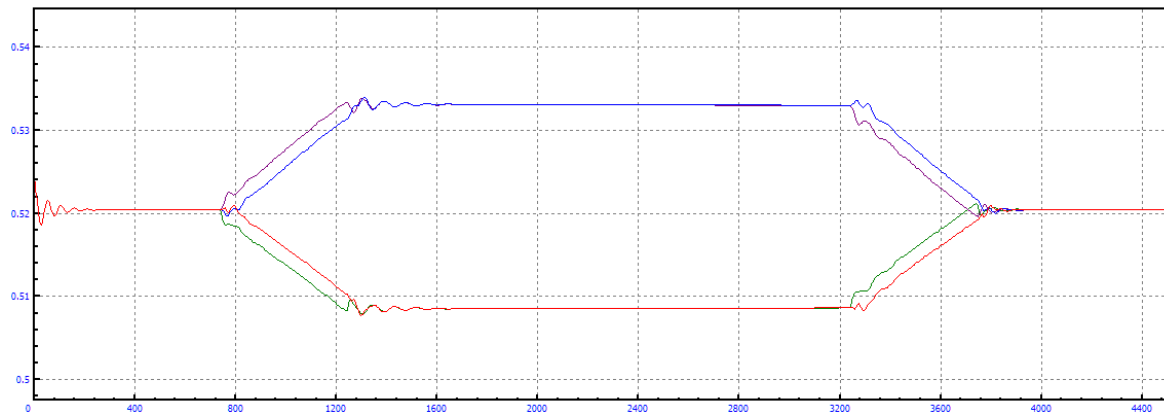


Figura A.298: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=55\text{m/s}$

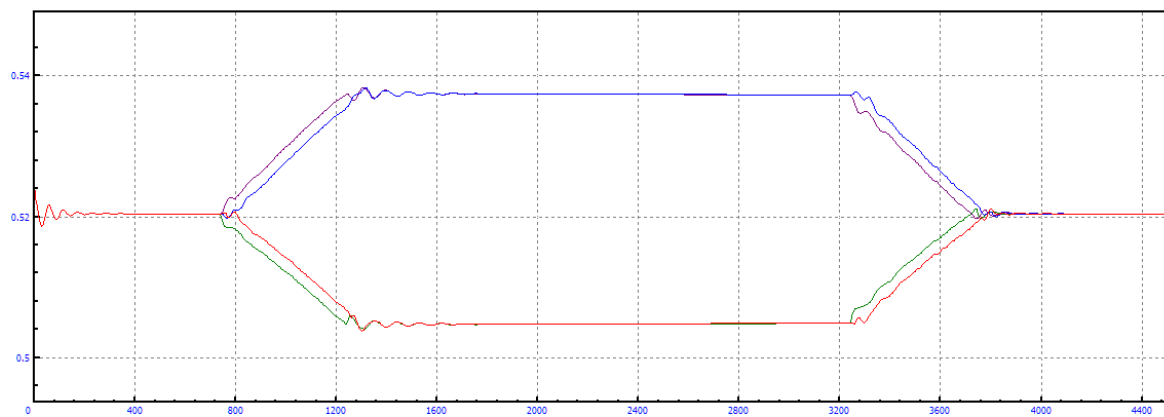


Figura A.299: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=60\text{m/s}$

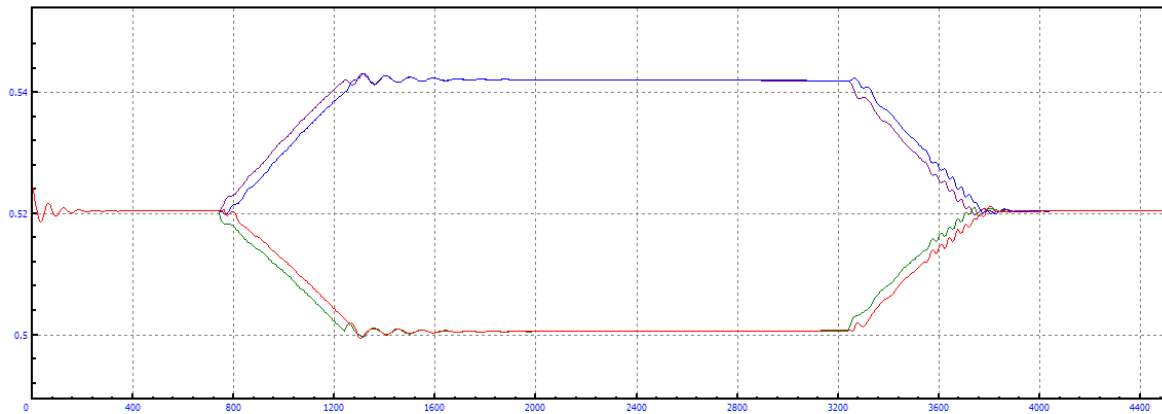


Figura A.300: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=65\text{m/s}$

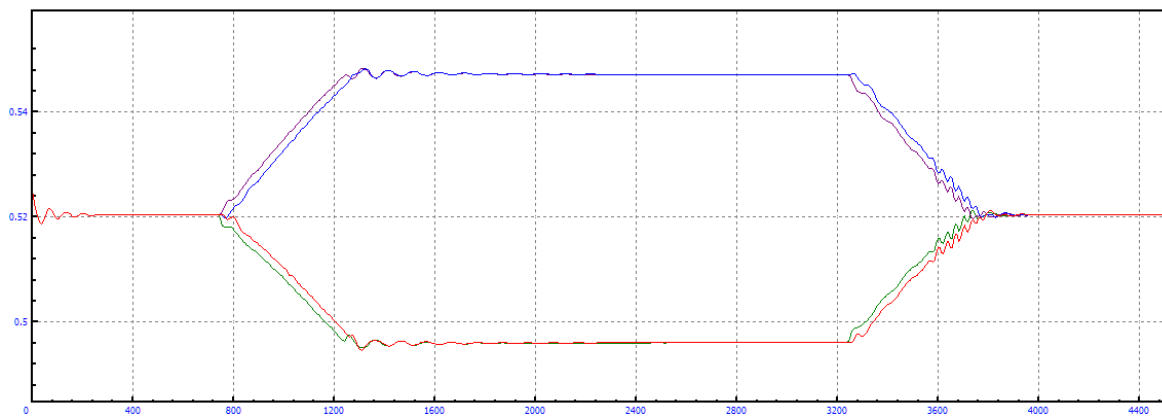


Figura A.301: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=70\text{m/s}$

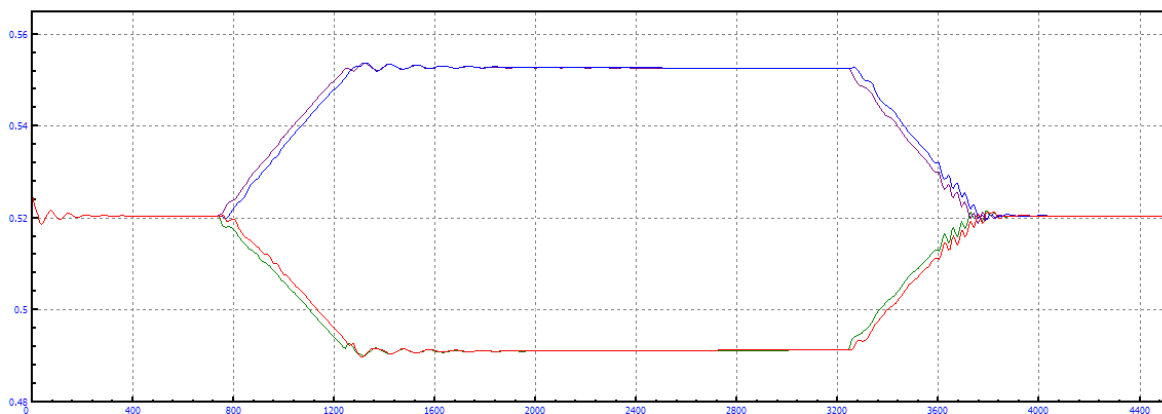


Figura A.302: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=75\text{m/s}$

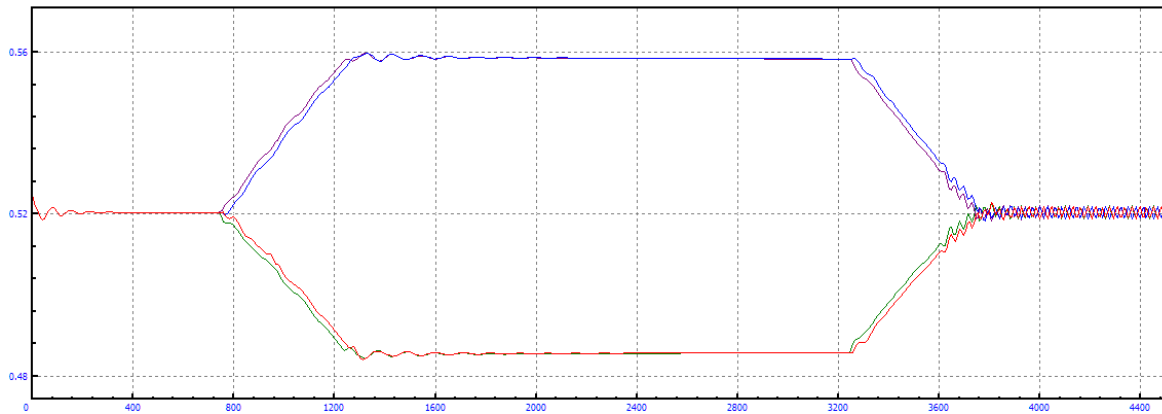


Figura A.303: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=80\text{m/s}$

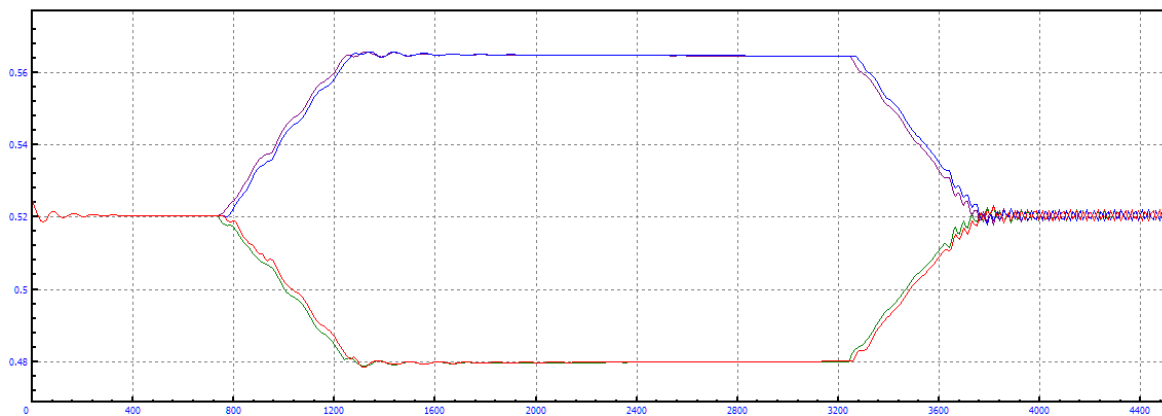


Figura A.304: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=85\text{m/s}$

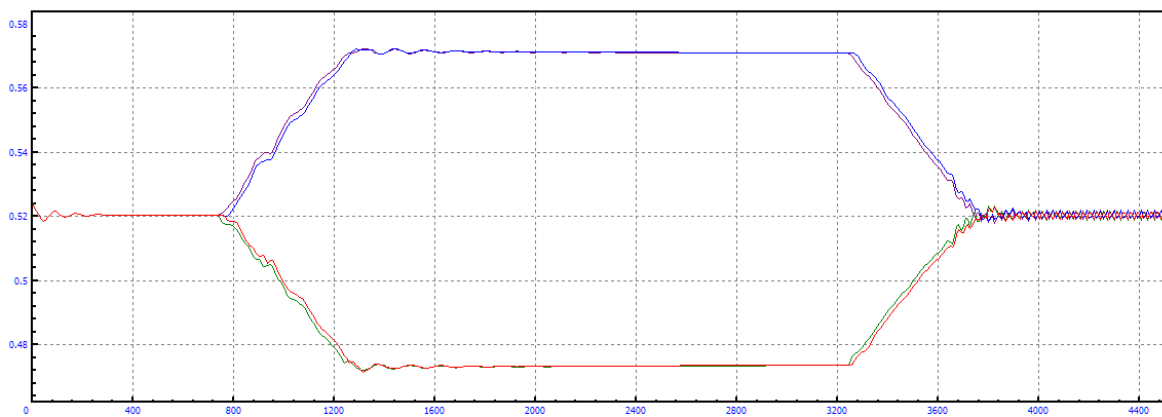


Figura A.305: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=90\text{m/s}$

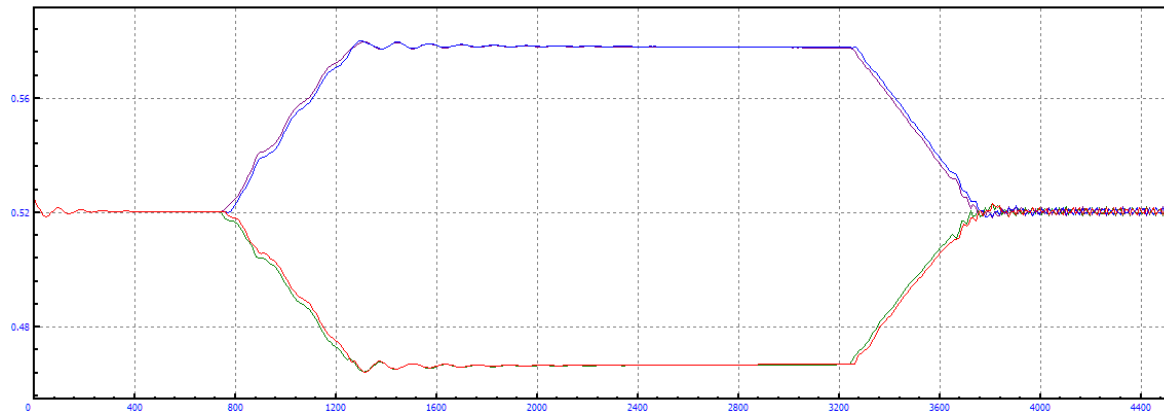


Figura A.306: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=95\text{m/s}$

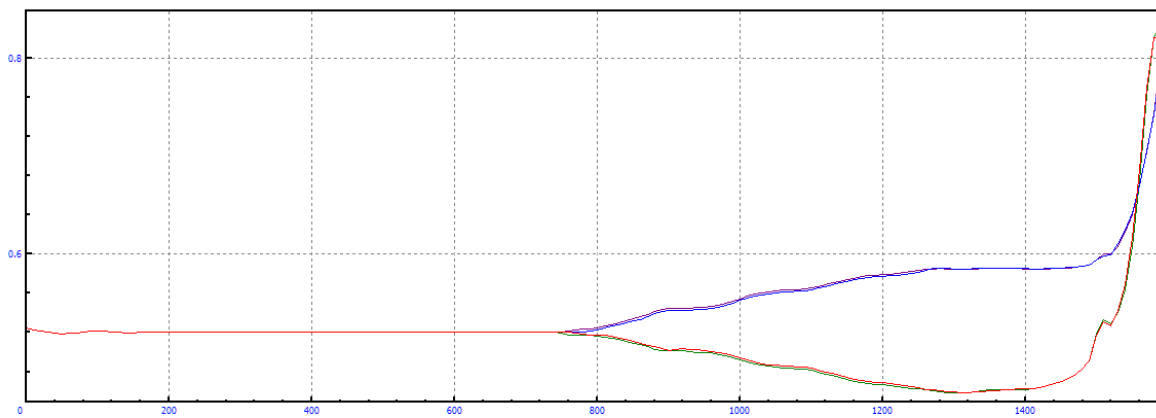


Figura A.307: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=100\text{m/s}$

B.2.6 MODIFICACIÓN=+20%

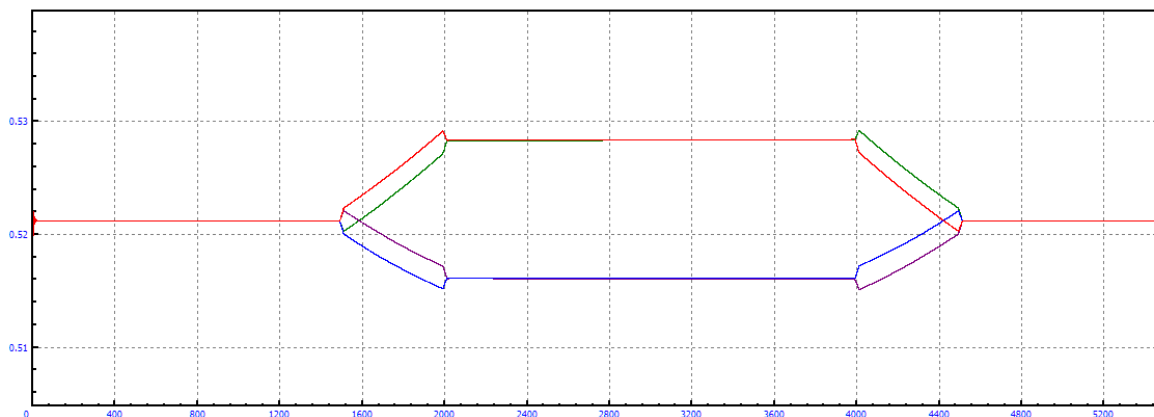


Figura A.308: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria=+20% y V=5m/s

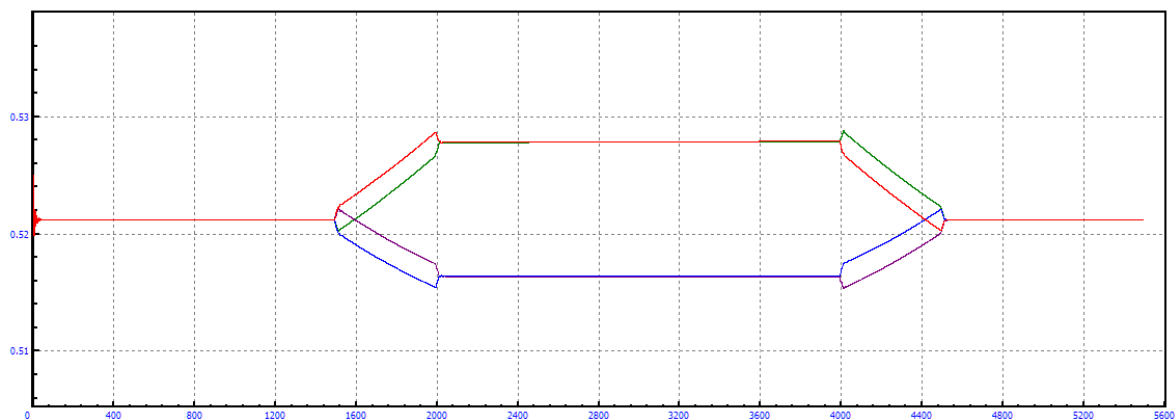


Figura A.309: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria=+20% y V=10m/s

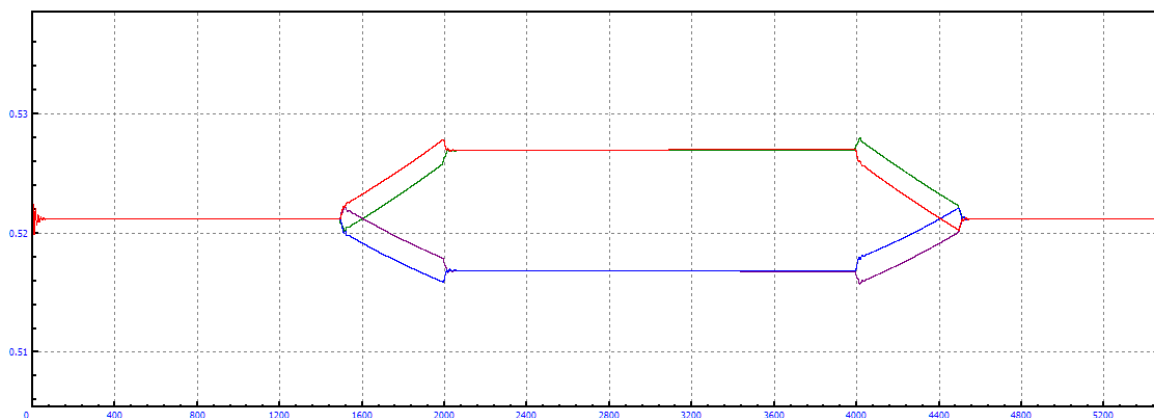


Figura A.310: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria=+20% y V=15m/s

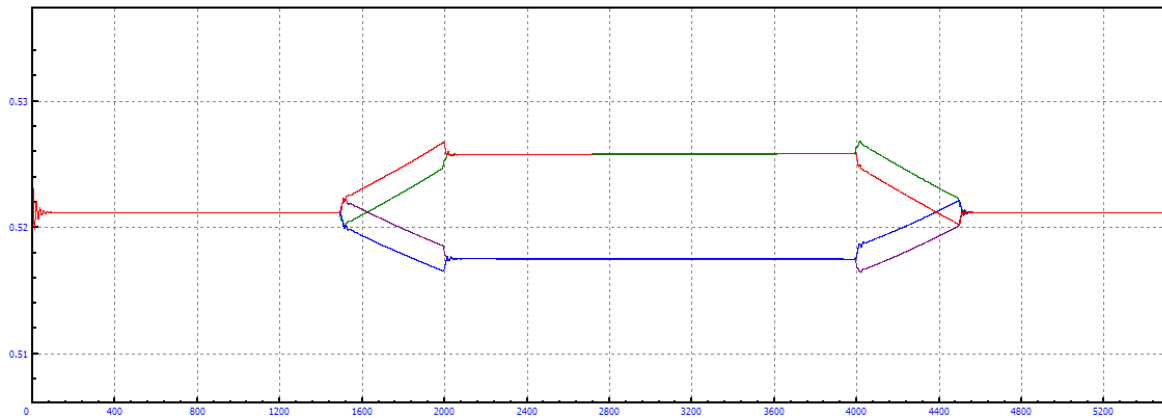


Figura A.311: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=20\text{m/s}$

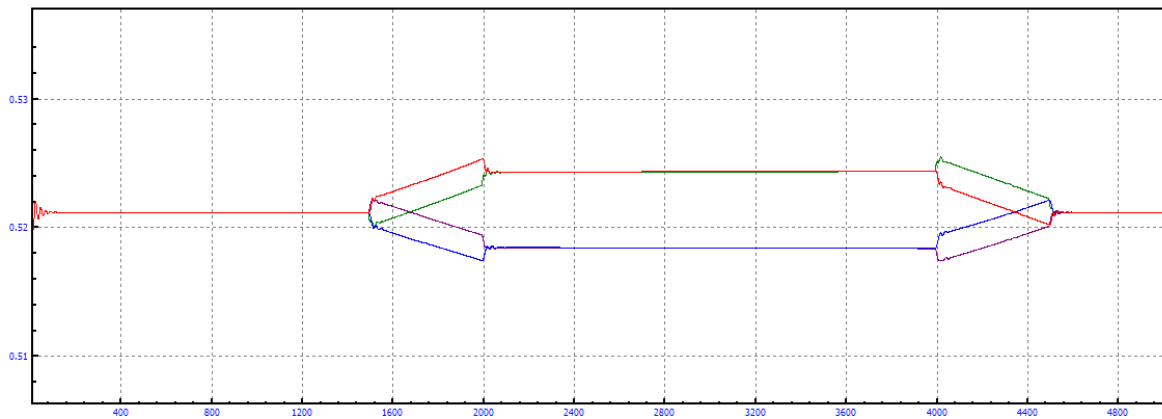


Figura A.312: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=25\text{m/s}$

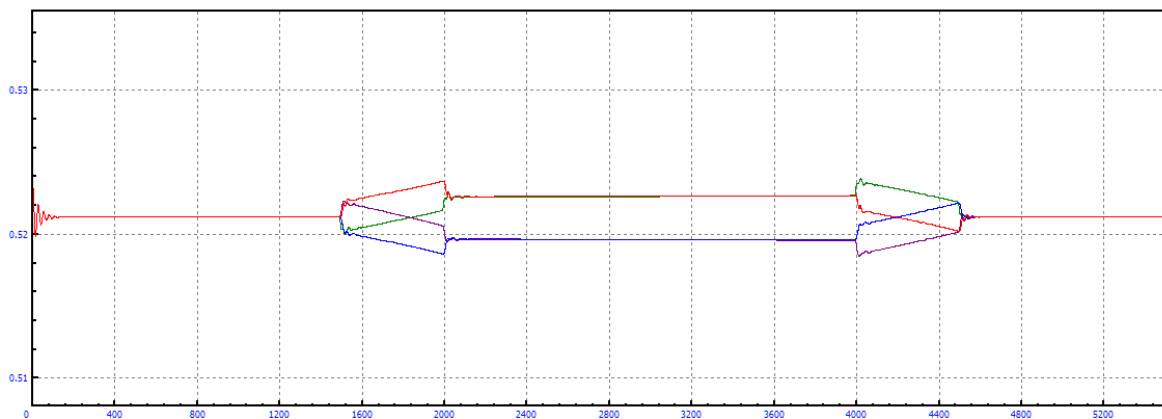


Figura A.313: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=30\text{m/s}$

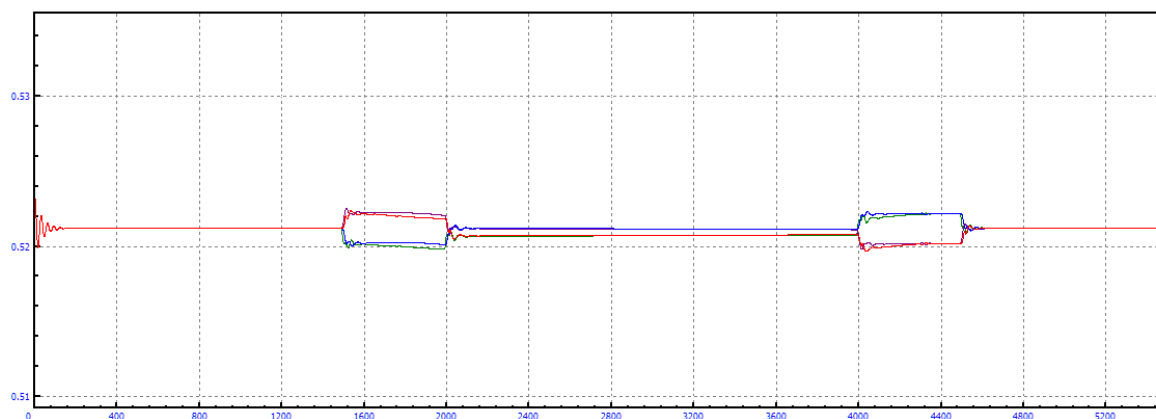


Figura A.314: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=35\text{m/s}$

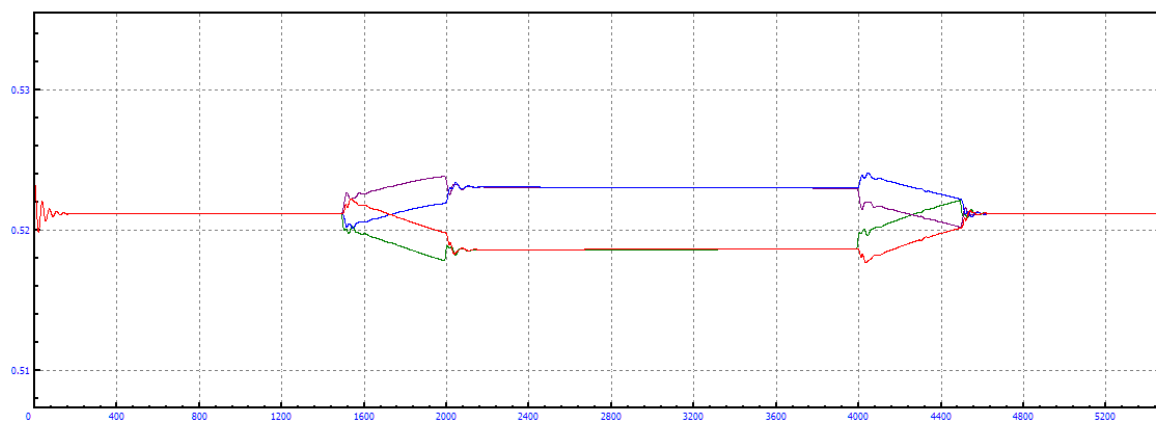


Figura A.315: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=40\text{m/s}$

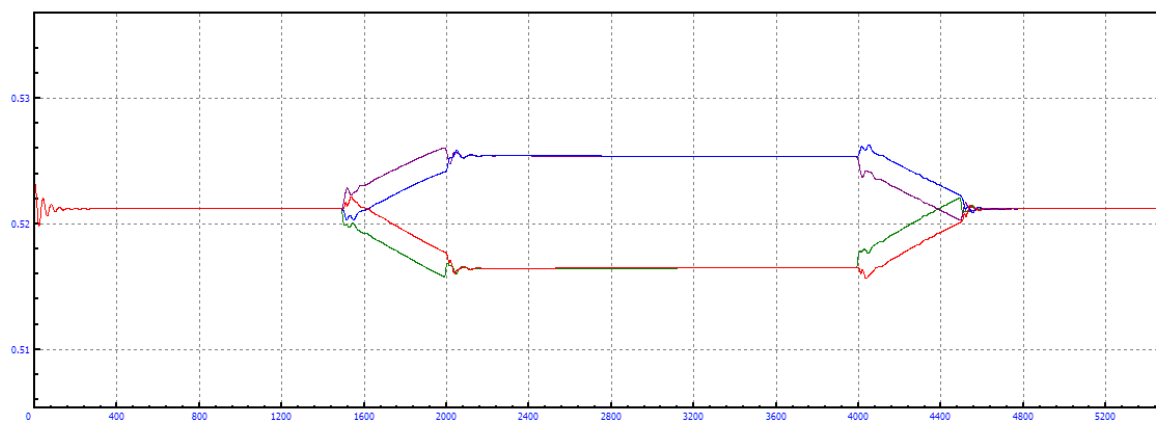


Figura A.316: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=45\text{m/s}$

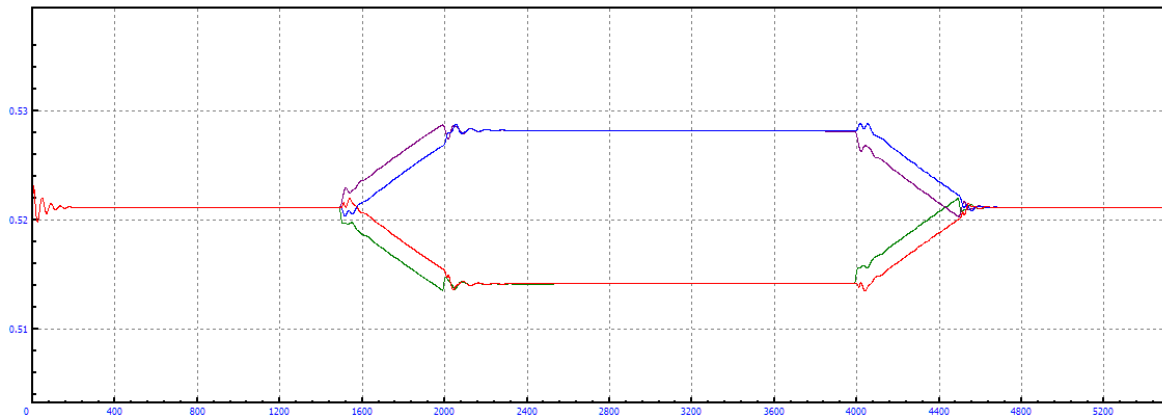


Figura A.317: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=50\text{m/s}$

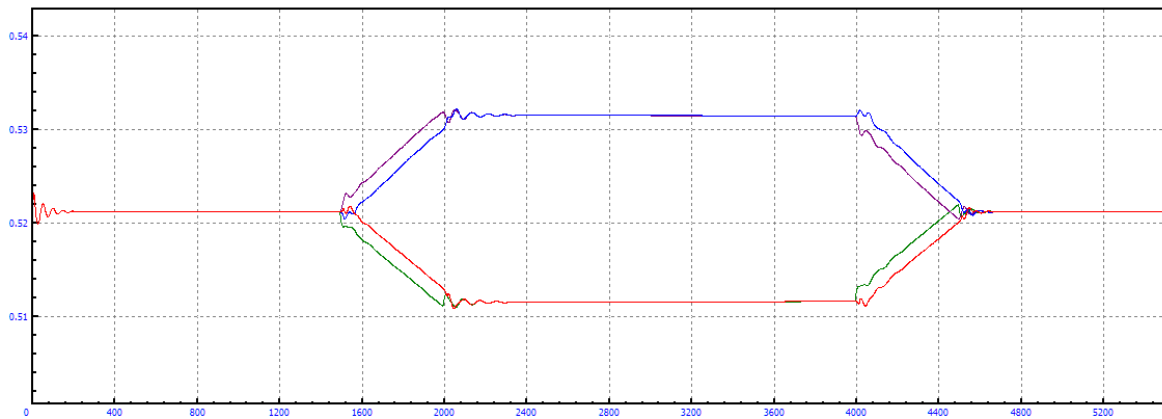


Figura A.318: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=55\text{m/s}$

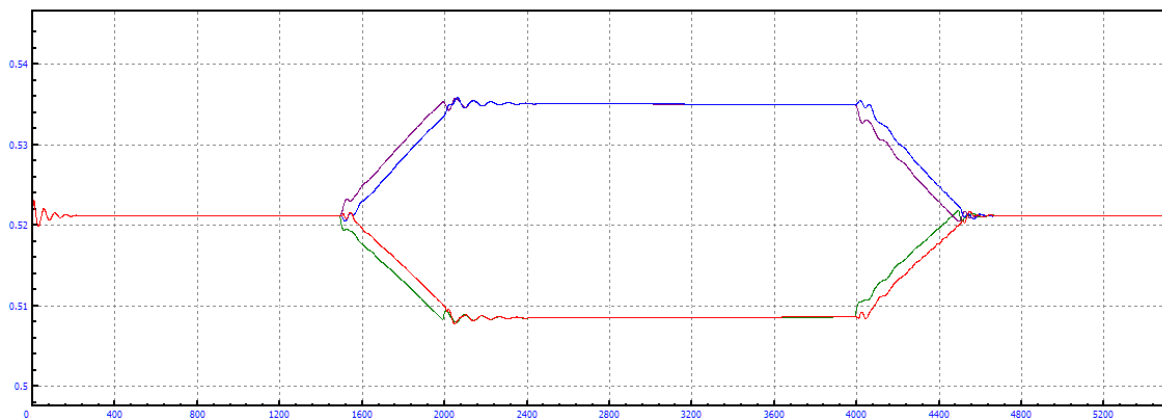


Figura A.319: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=60\text{m/s}$

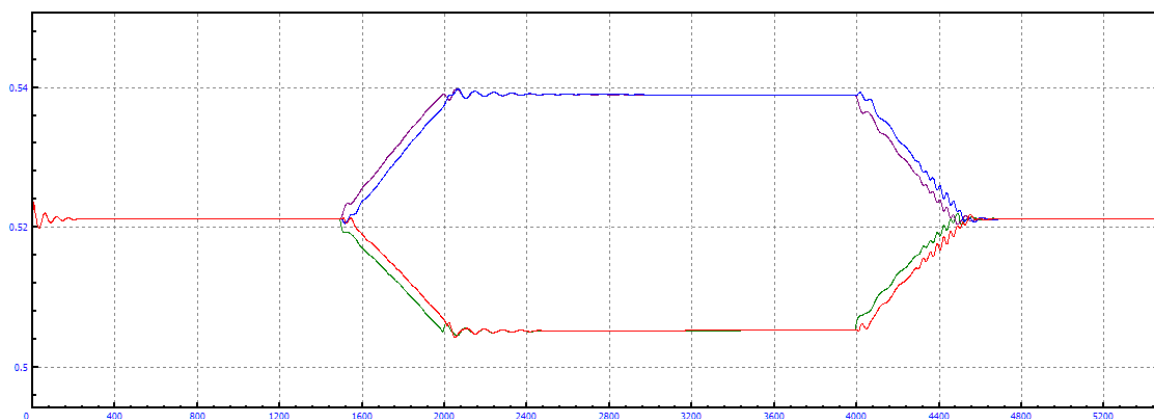


Figura A.320: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=65\text{m/s}$

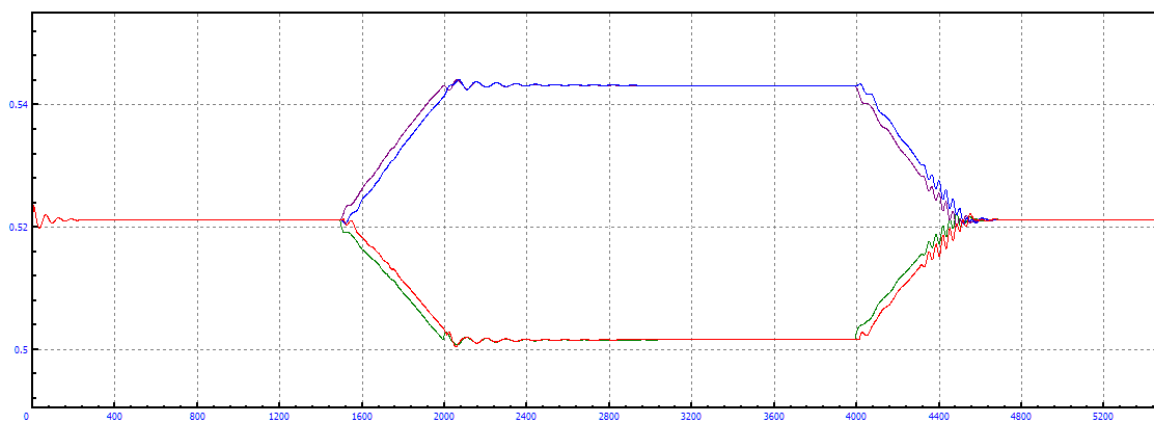


Figura A.321: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=70\text{m/s}$

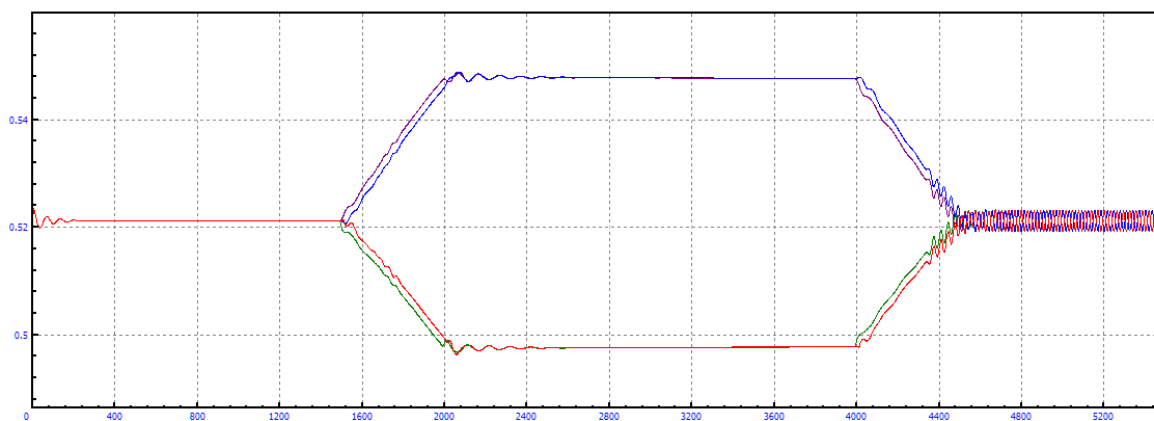


Figura A.322: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=75\text{m/s}$

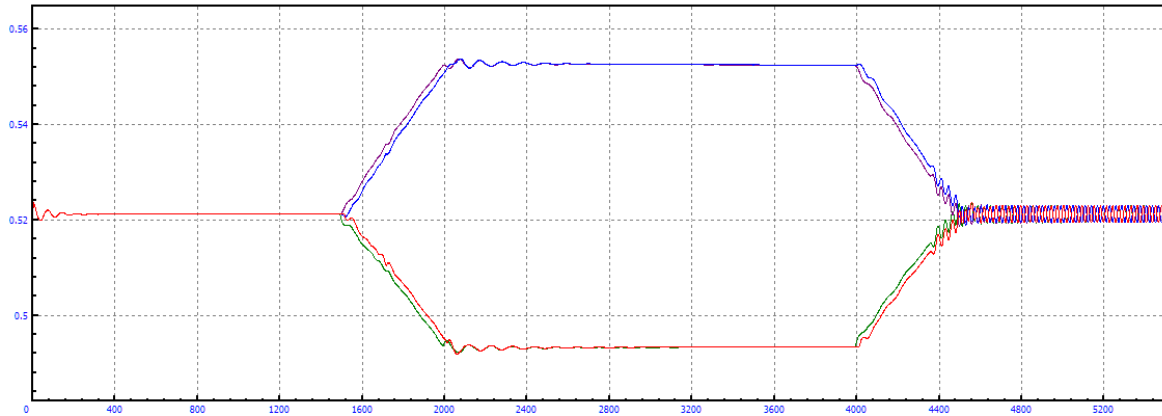


Figura A.323: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=80\text{m/s}$

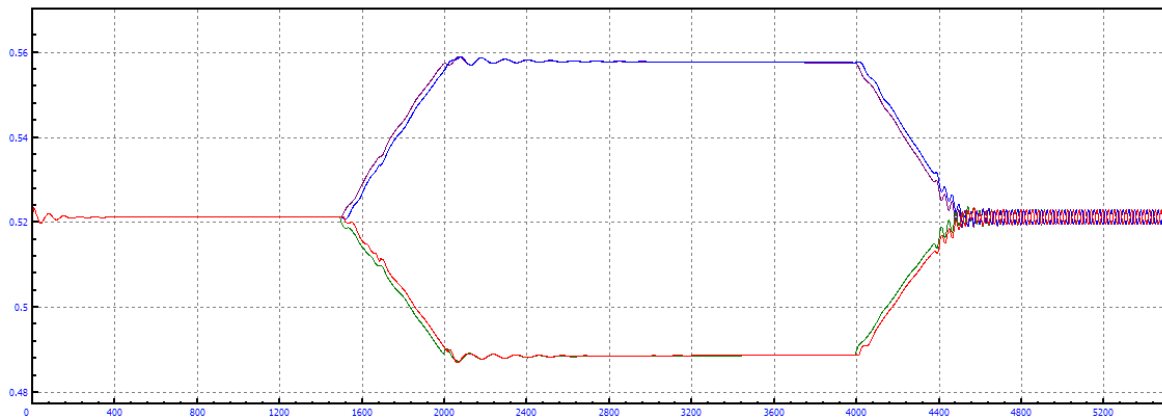


Figura A.324: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=85\text{m/s}$

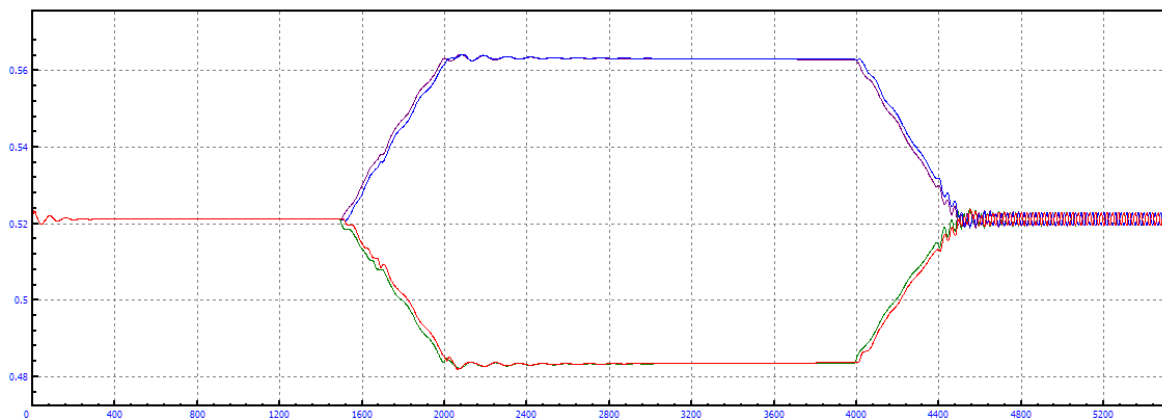


Figura A.325: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=90\text{m/s}$

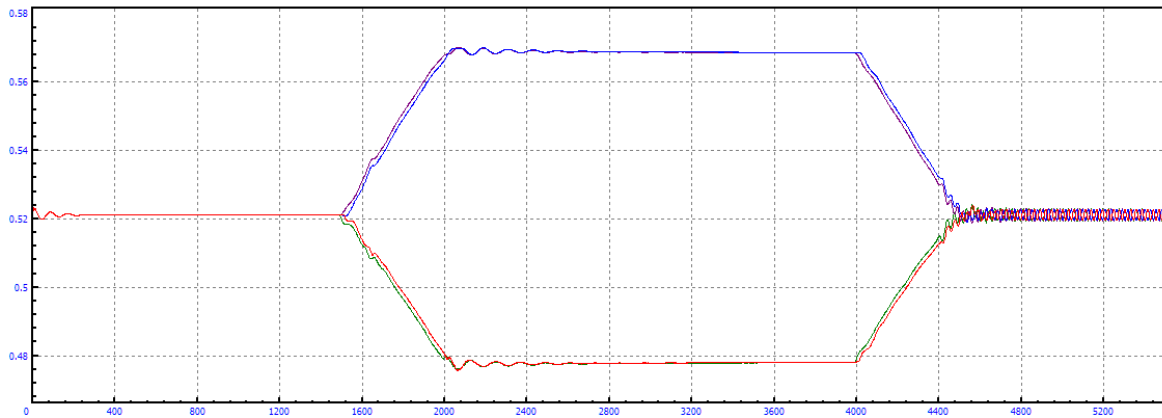


Figura A.326: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=95\text{m/s}$

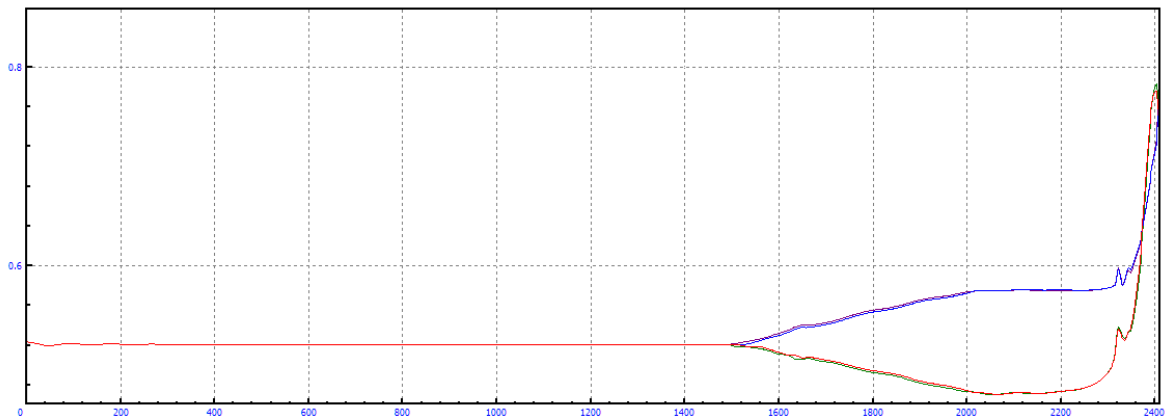


Figura A.327: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=100\text{m/s}$

B.2.7 MODIFICACIÓN=+40%

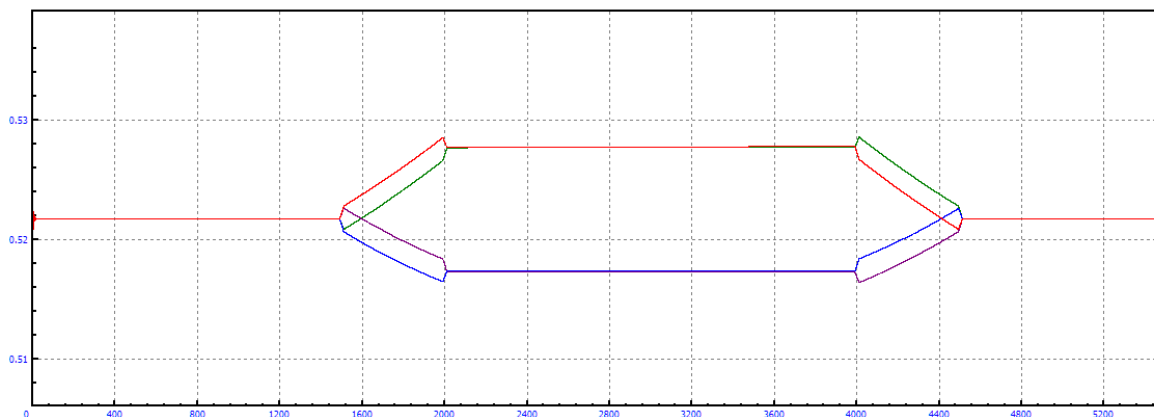


Figura A.328: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=5\text{m/s}$

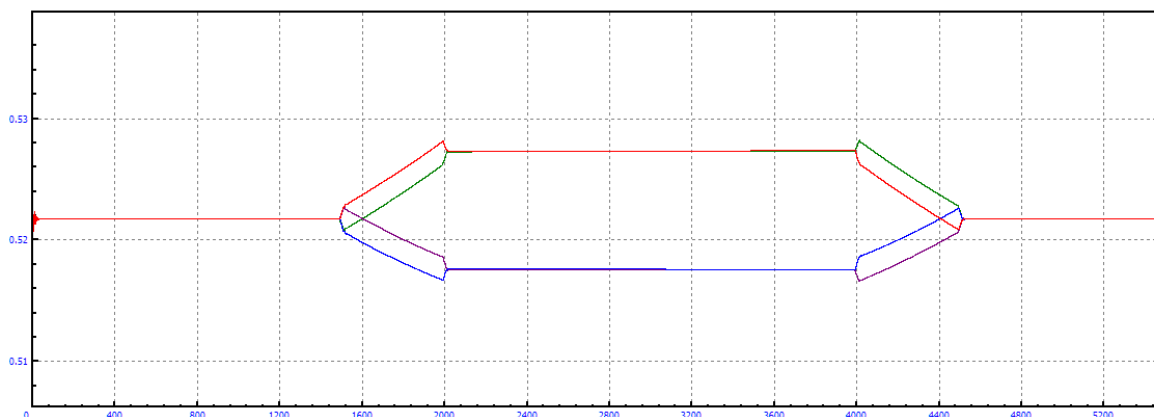


Figura A.329: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=10\text{m/s}$

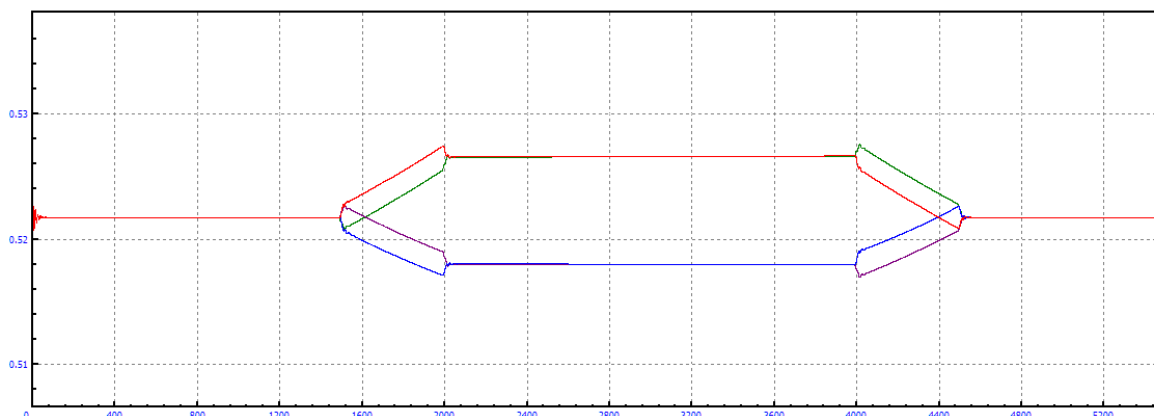


Figura A.330: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=15\text{m/s}$

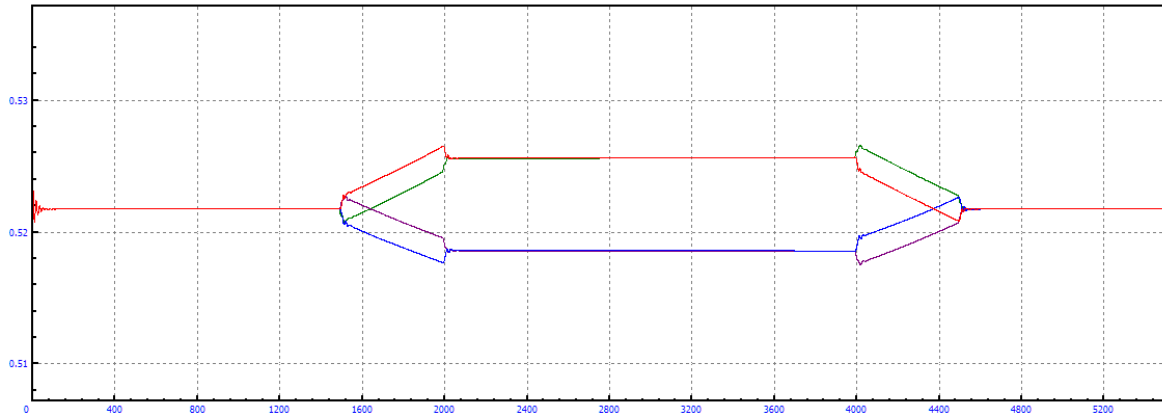


Figura A.331: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=20\text{m/s}$

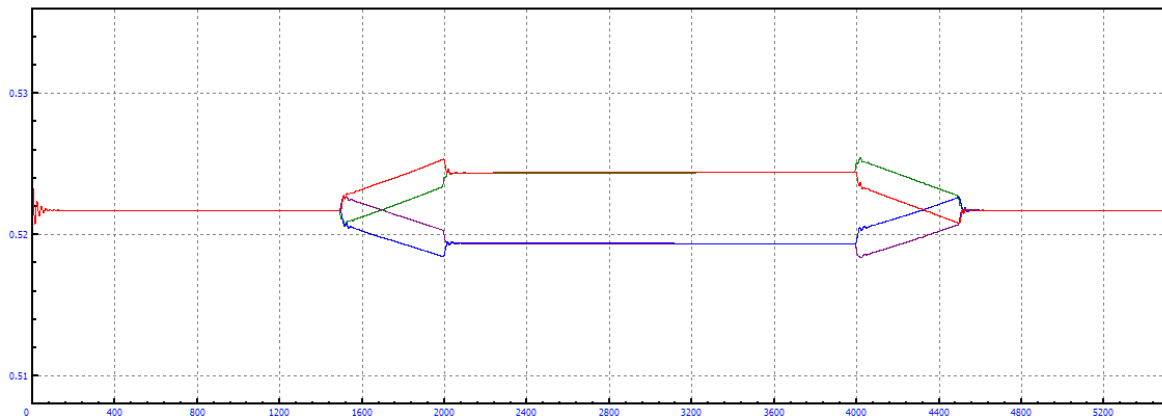


Figura A.332: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=25\text{m/s}$

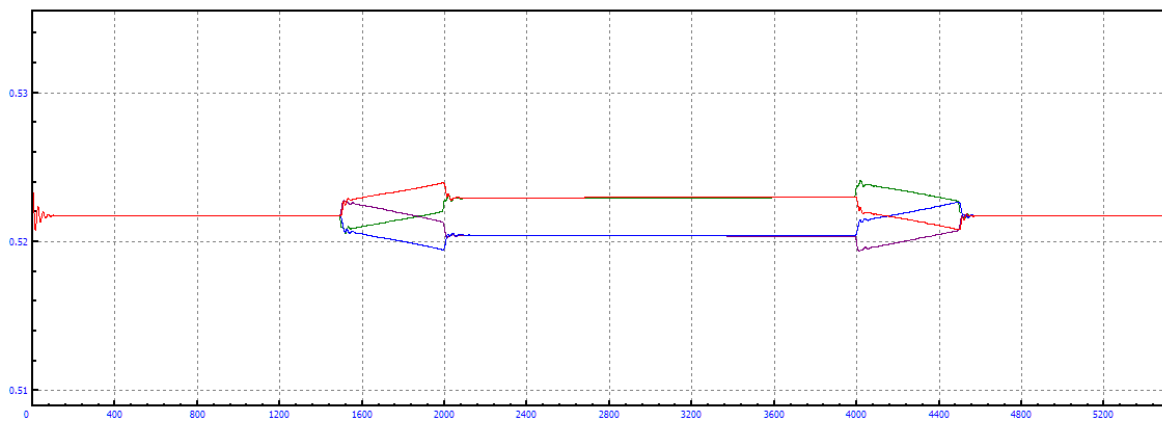


Figura A.333: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=30\text{m/s}$

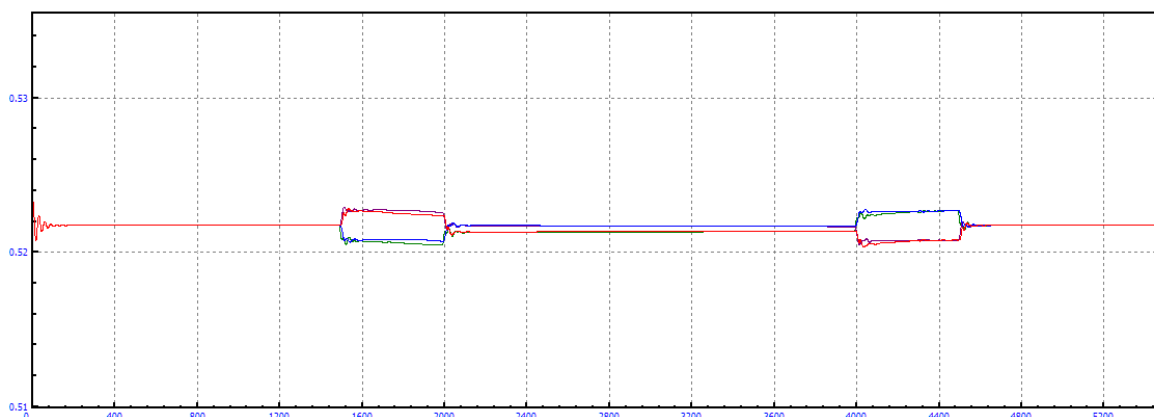


Figura A.334: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=35\text{m/s}$

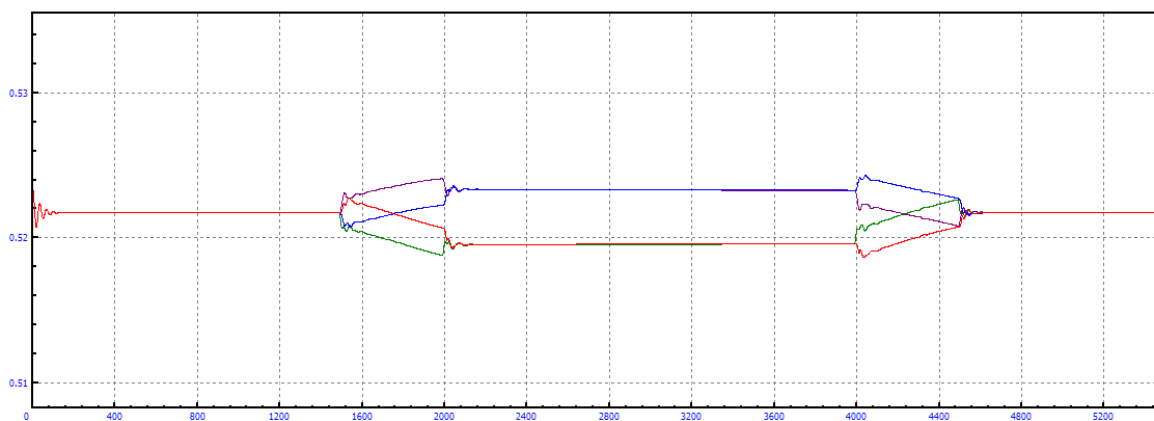


Figura A.335: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=40\text{m/s}$

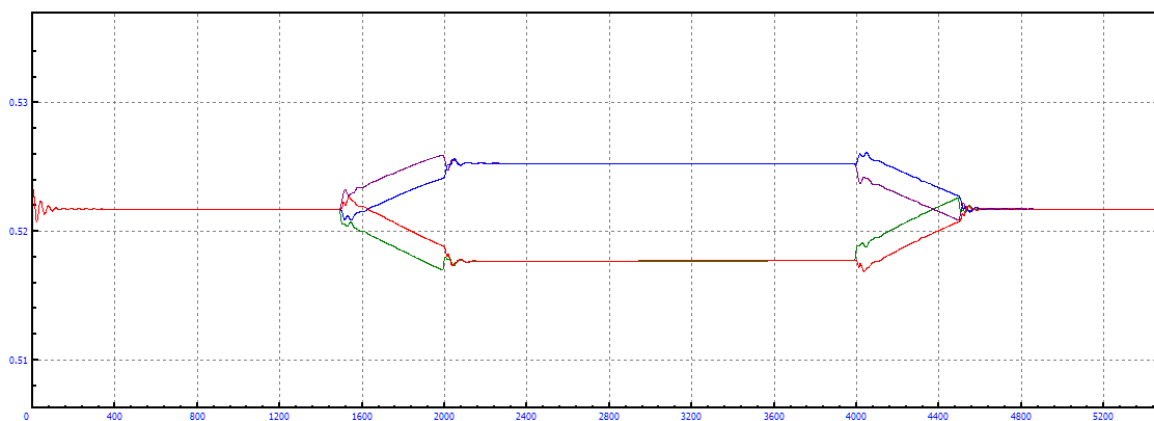


Figura A.336: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=45\text{m/s}$

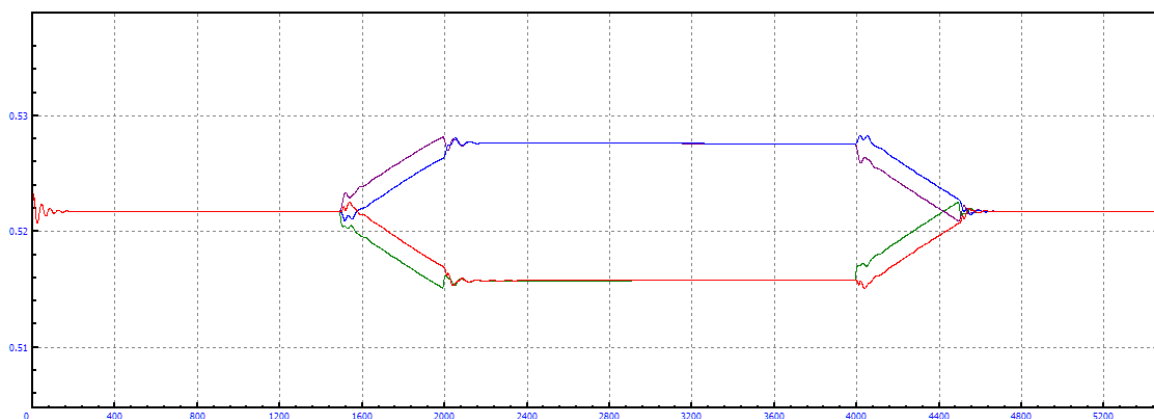


Figura A.337: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= $+40\%$ y $V=50\text{m/s}$

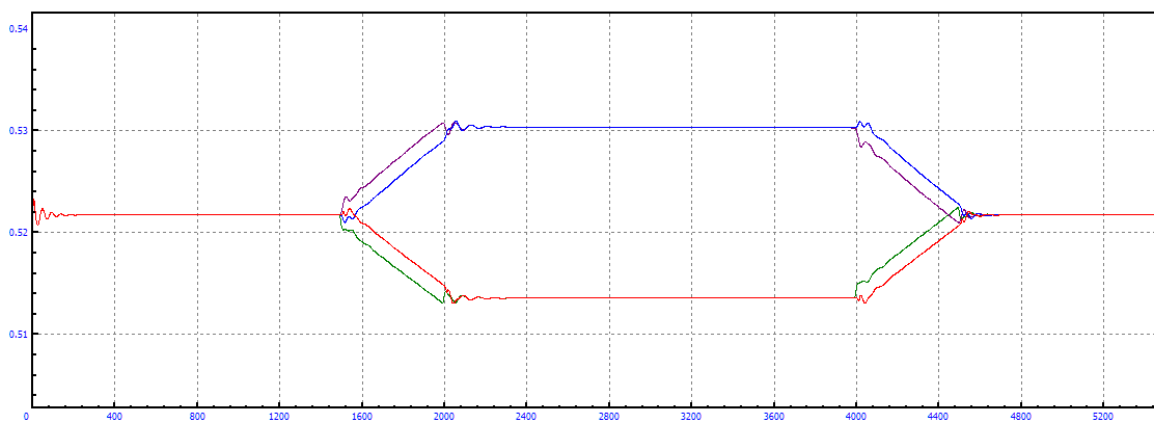


Figura A.338: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= $+40\%$ y $V=55\text{m/s}$

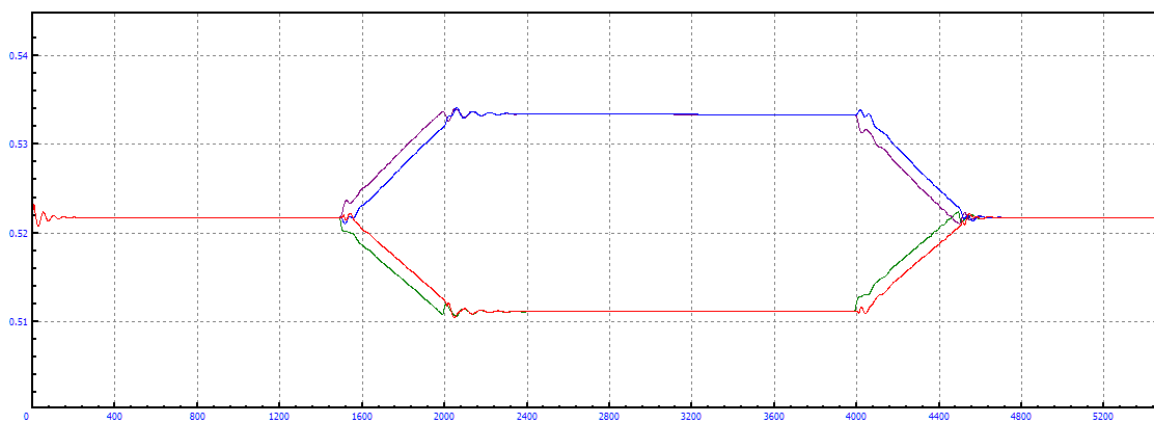


Figura A.339: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= $+40\%$ y $V=60\text{m/s}$

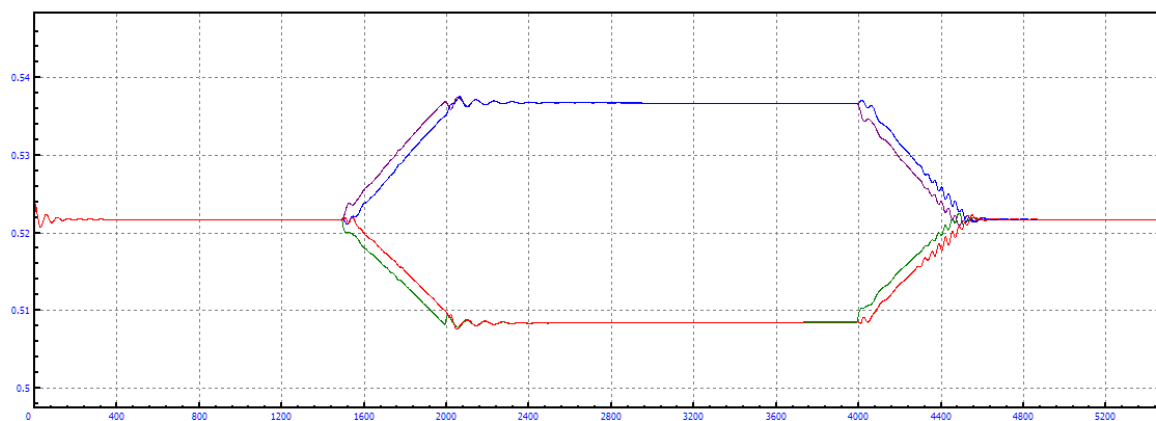


Figura A.340: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=65\text{m/s}$

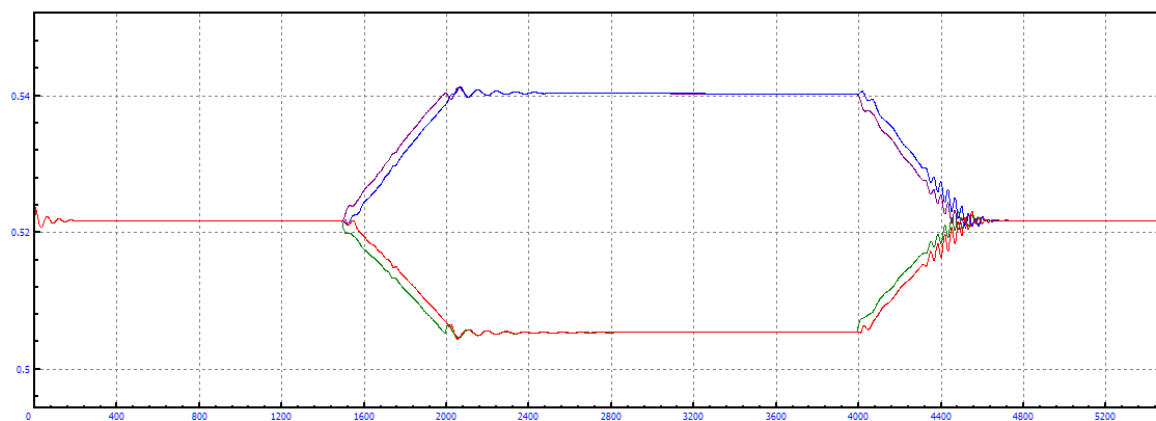


Figura A.341: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=70\text{m/s}$

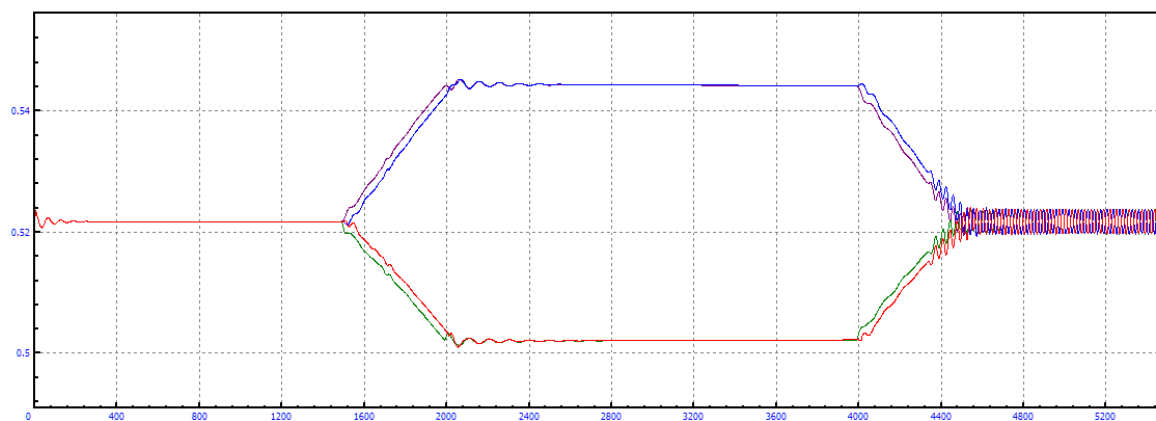


Figura A.342: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=75\text{m/s}$

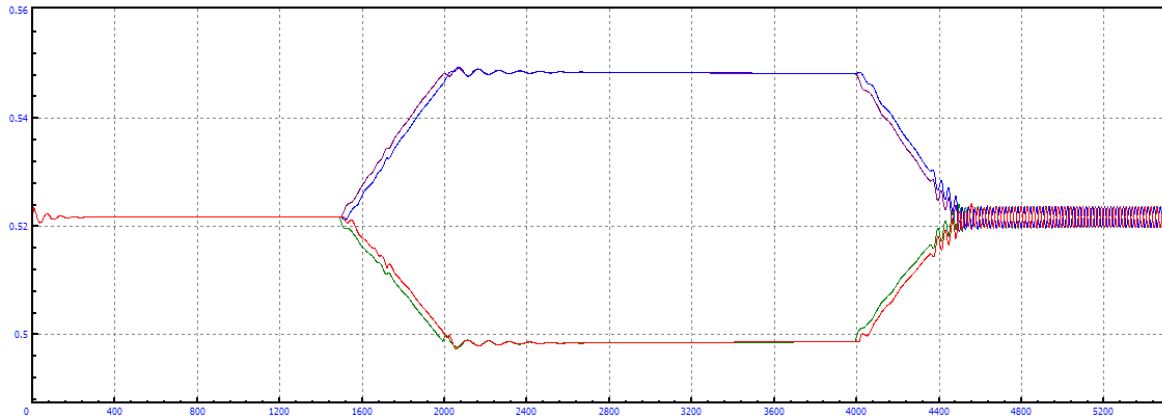


Figura A.343: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=80\text{m/s}$

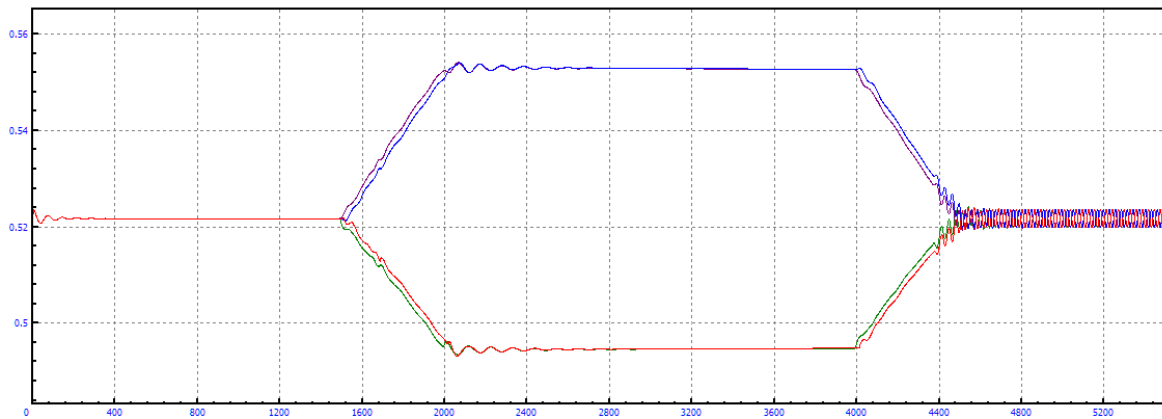


Figura A.344: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=85\text{m/s}$

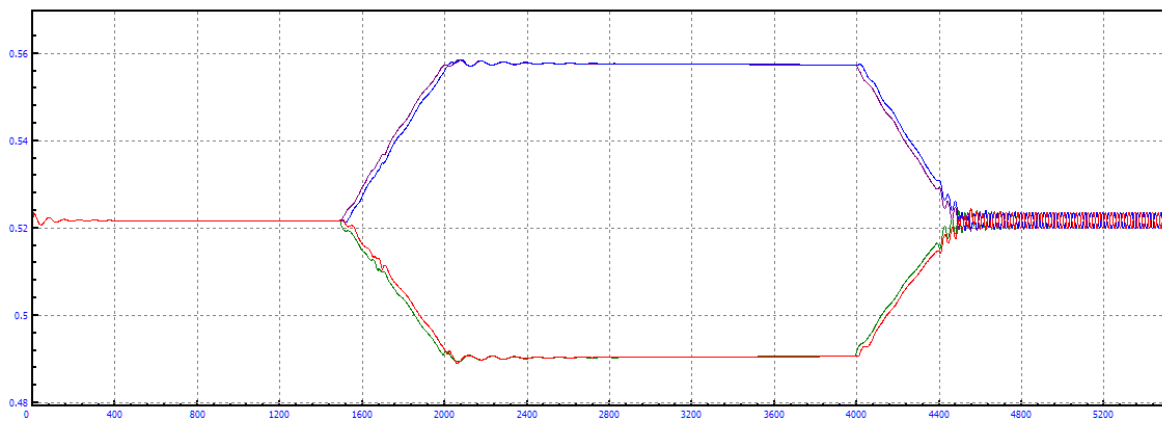


Figura A.345: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=90\text{m/s}$

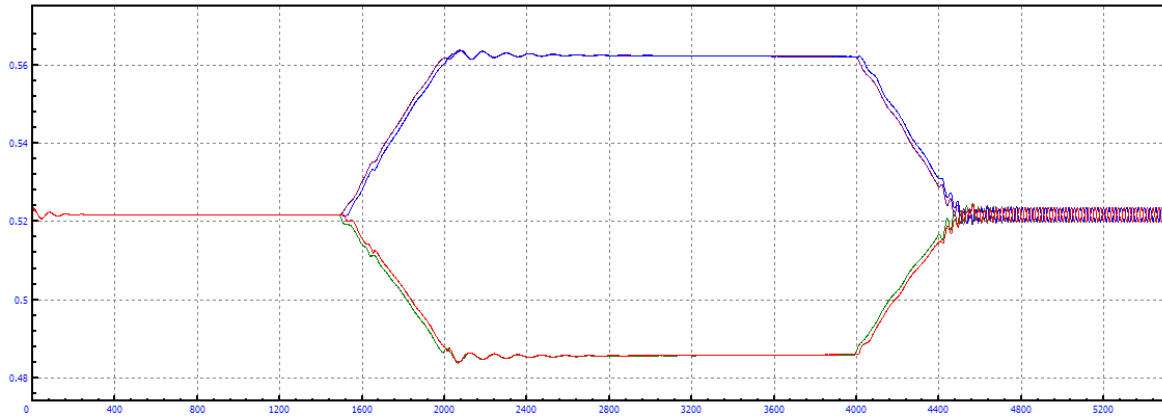


Figura A.346: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=95\text{m/s}$

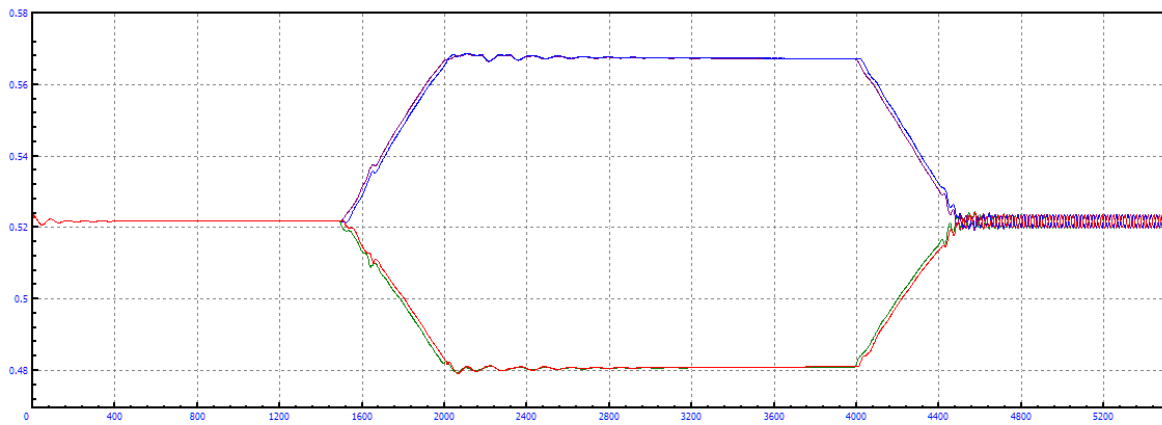


Figura A.347: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=100\text{m/s}$

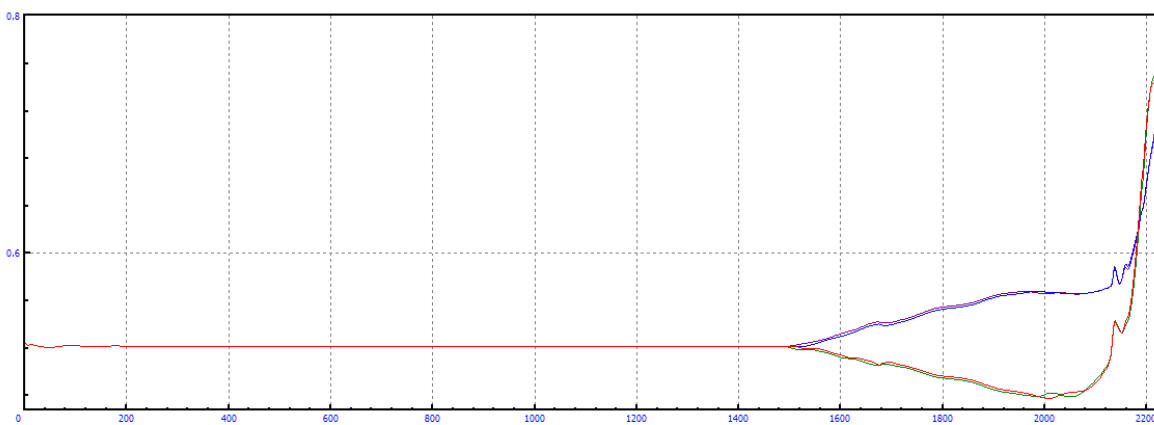


Figura A.348: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=105\text{m/s}$

B.2.8 MODIFICACIÓN=+60

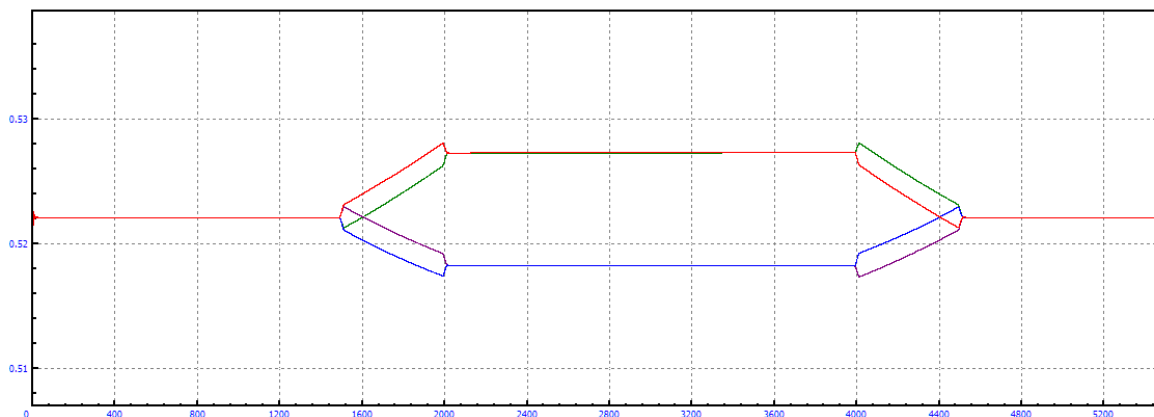


Figura A.349: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=5\text{m/s}$

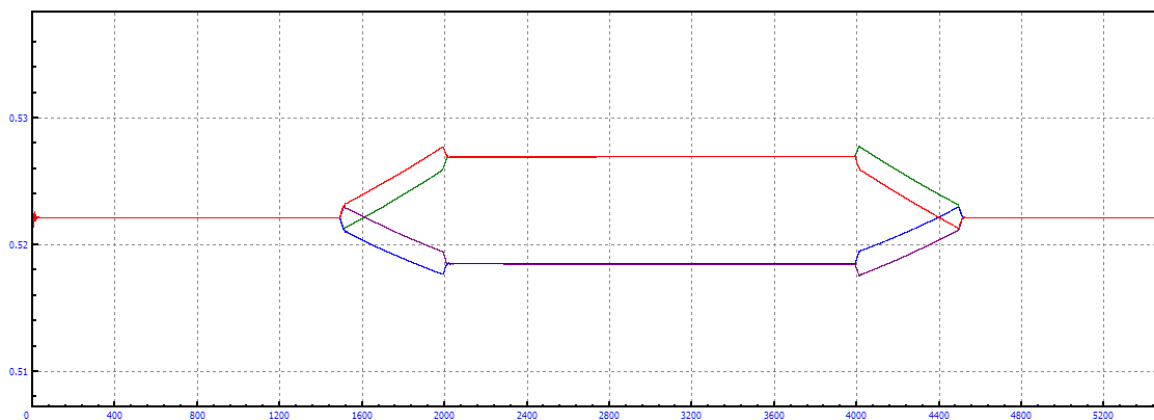


Figura A.350: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=10\text{m/s}$

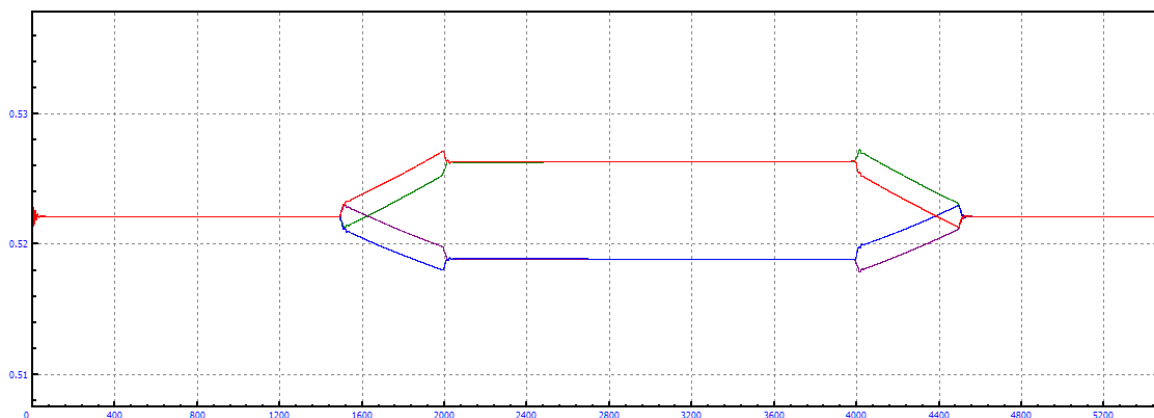


Figura A.351: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=15\text{m/s}$

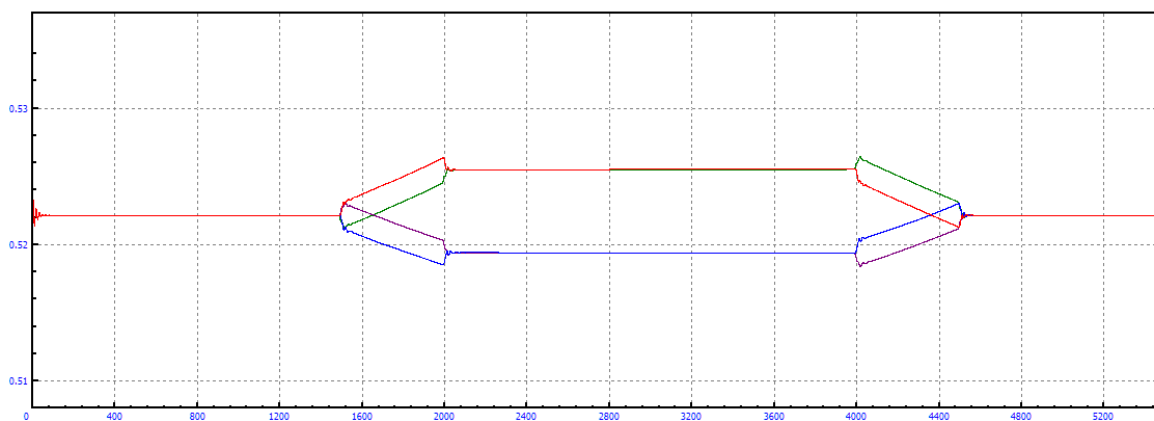


Figura A.352: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=20\text{m/s}$

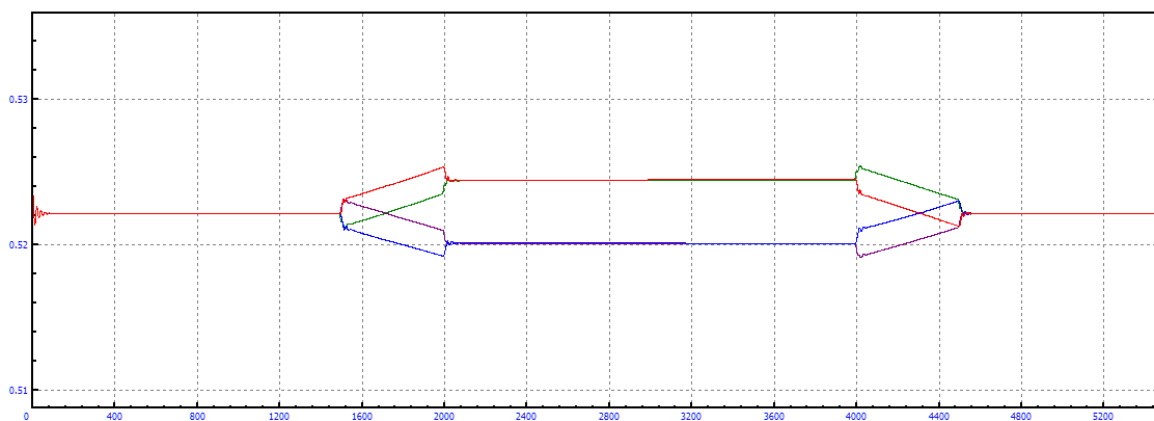


Figura A.353: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=25\text{m/s}$

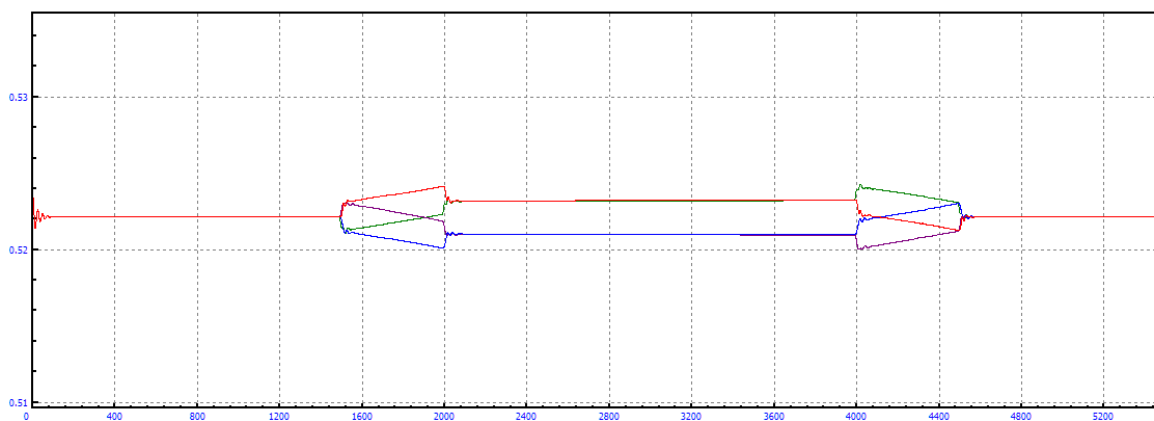


Figura A.354: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=30\text{m/s}$

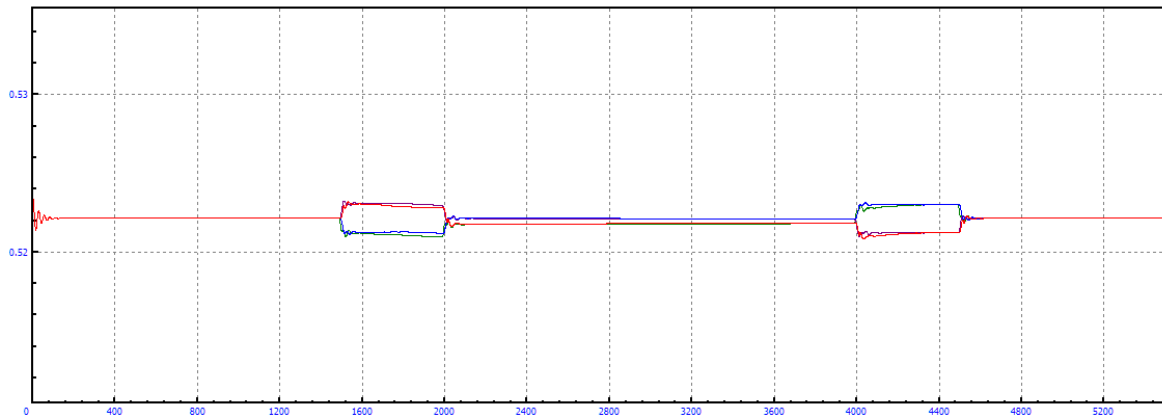


Figura A.355: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=35\text{m/s}$

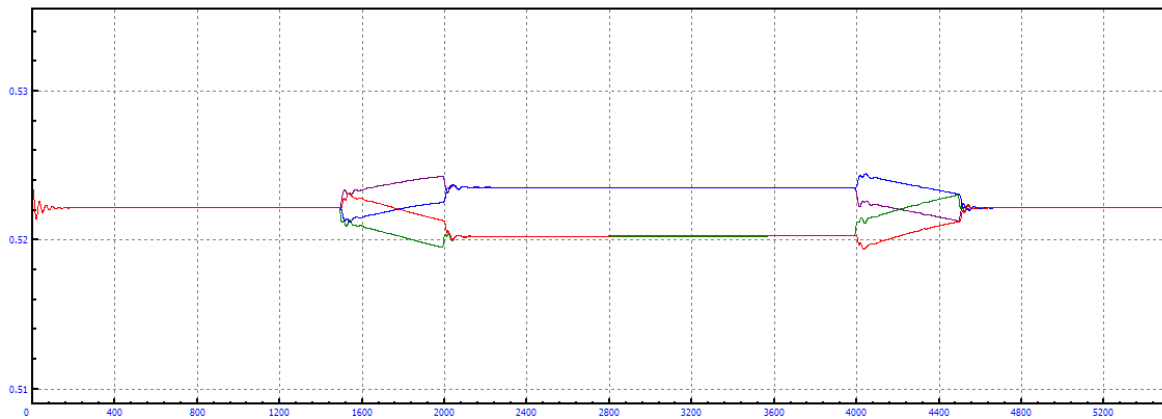


Figura A.356: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=40\text{m/s}$

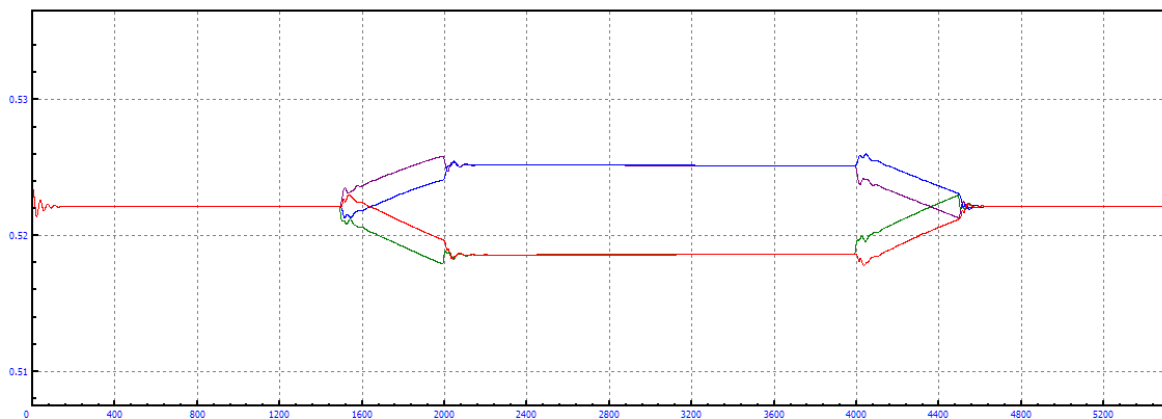


Figura A.357: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=45\text{m/s}$

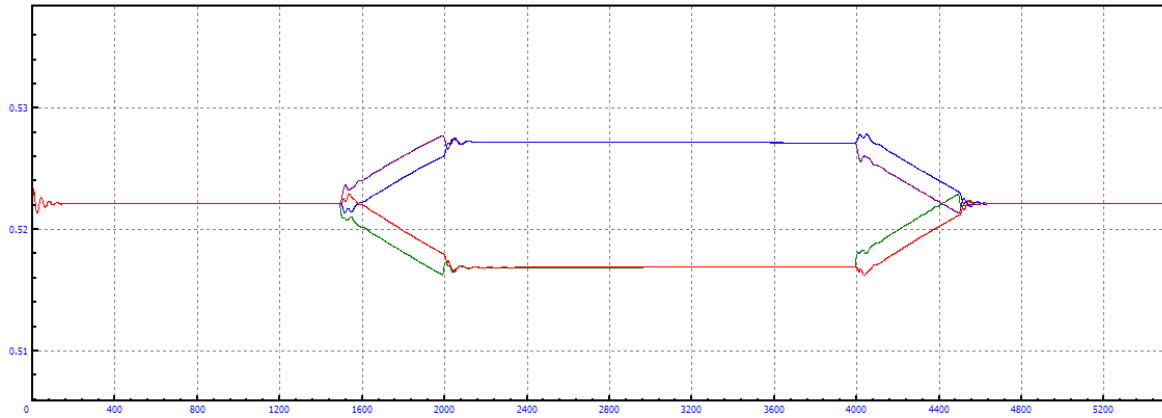


Figura A.358: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= $+60\%$ y $V=50\text{m/s}$

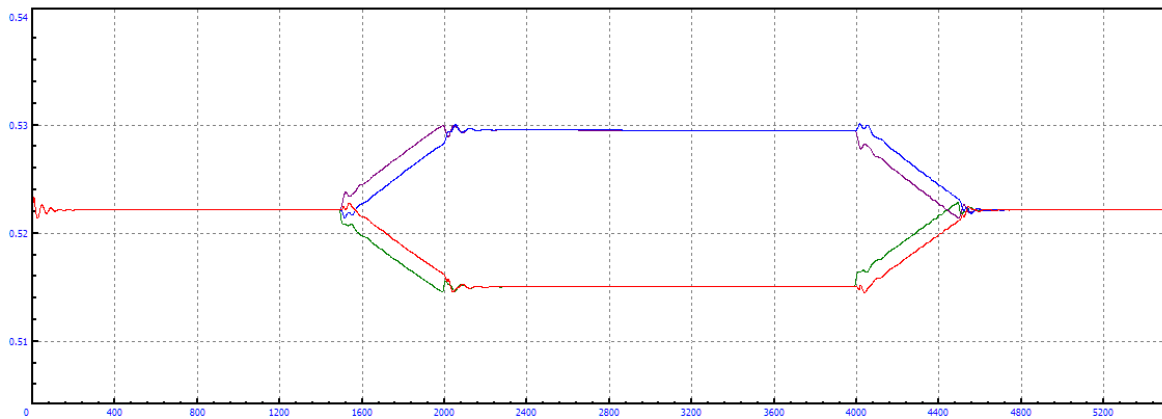


Figura A.359: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= $+60\%$ y $V=55\text{m/s}$

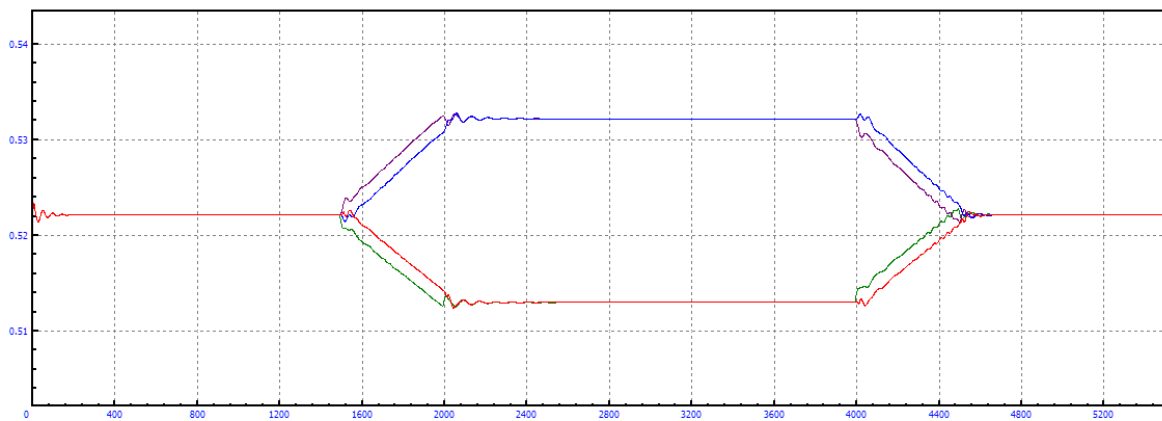


Figura A.360: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria= $+60\%$ y $V=60\text{m/s}$

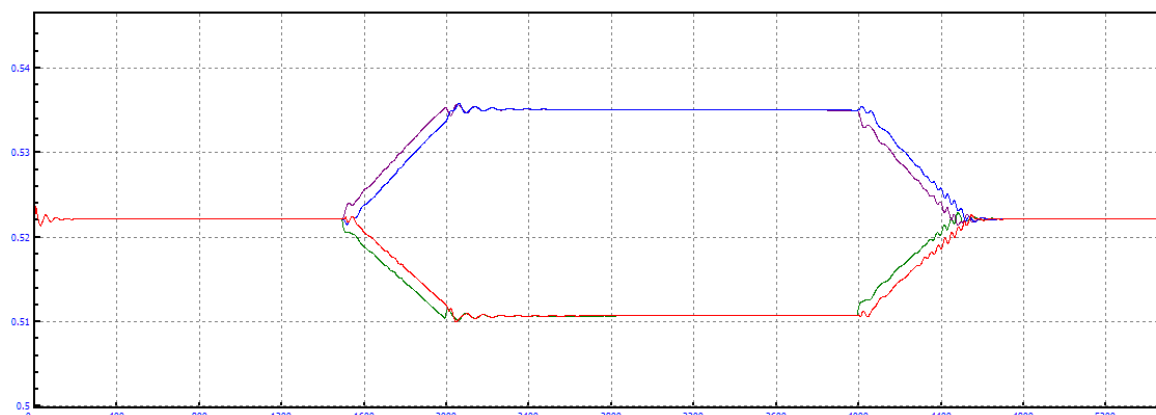


Figura A.361: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=65\text{m/s}$

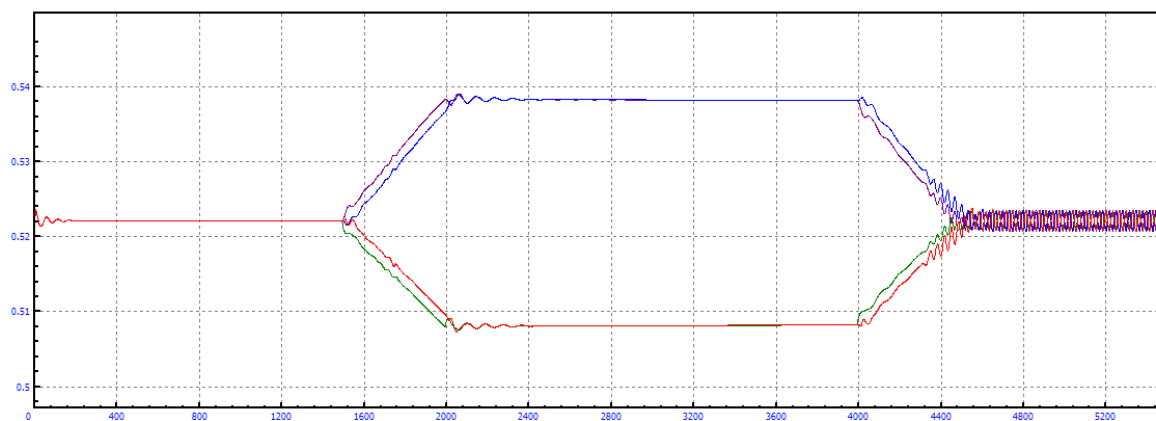


Figura A.362: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=70\text{m/s}$

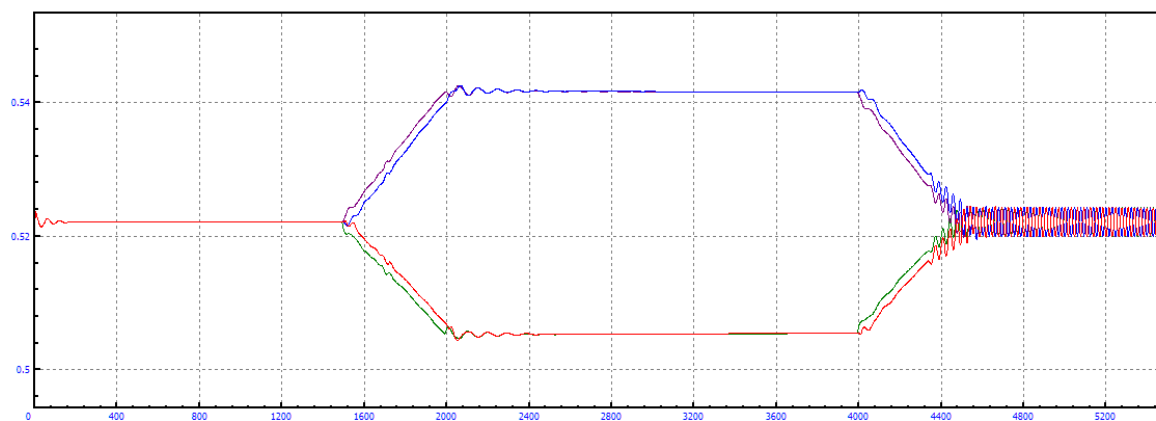


Figura A.363: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=75\text{m/s}$

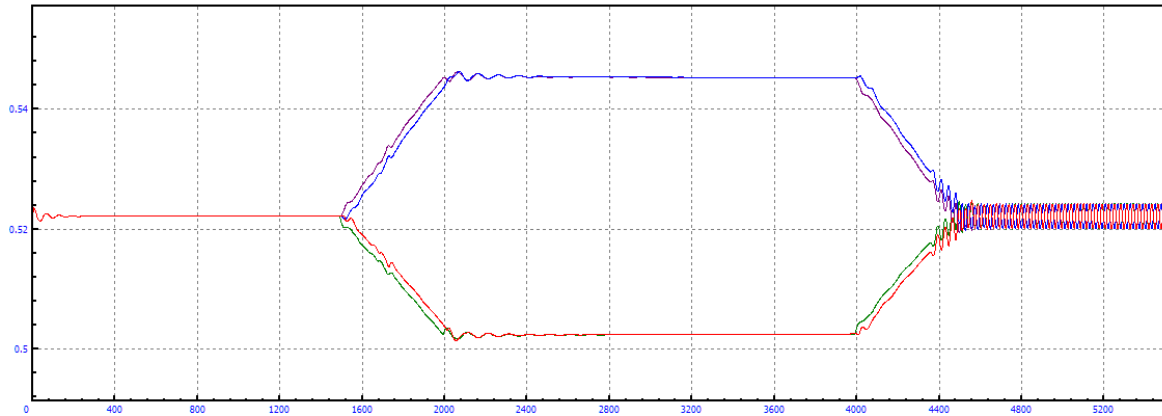


Figura A.364: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=80\text{m/s}$

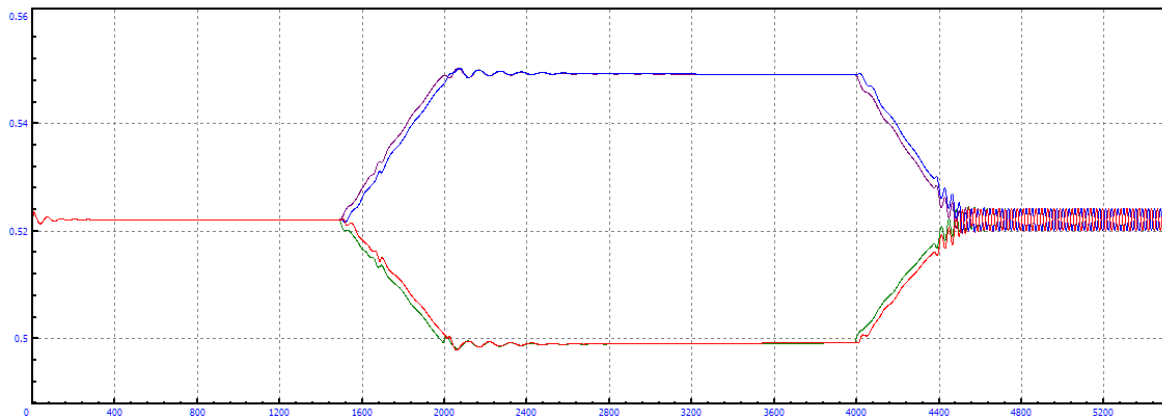


Figura A.365: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=85\text{m/s}$

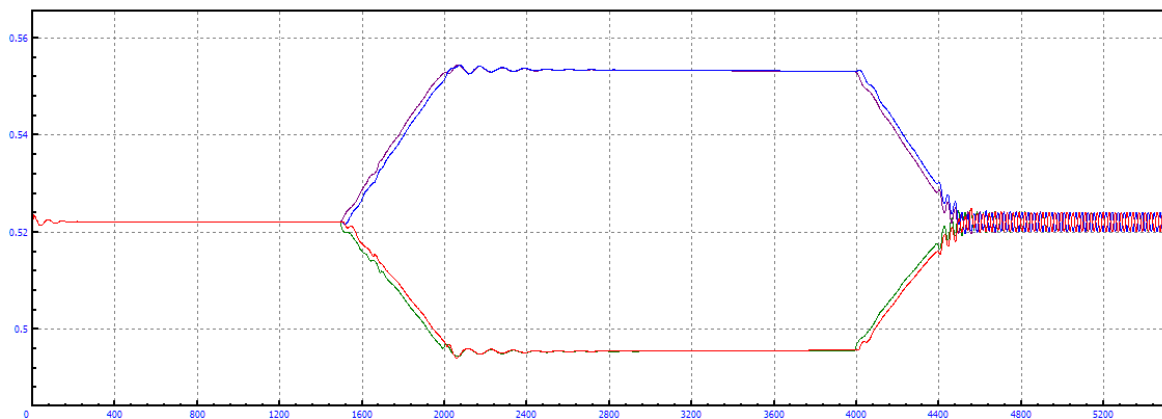


Figura A.366: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=90\text{m/s}$

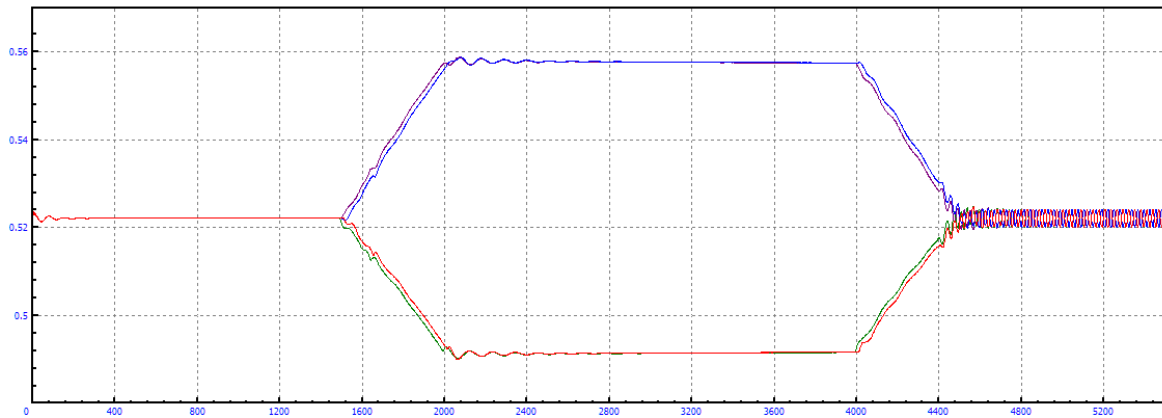


Figura A.367: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=95\text{m/s}$

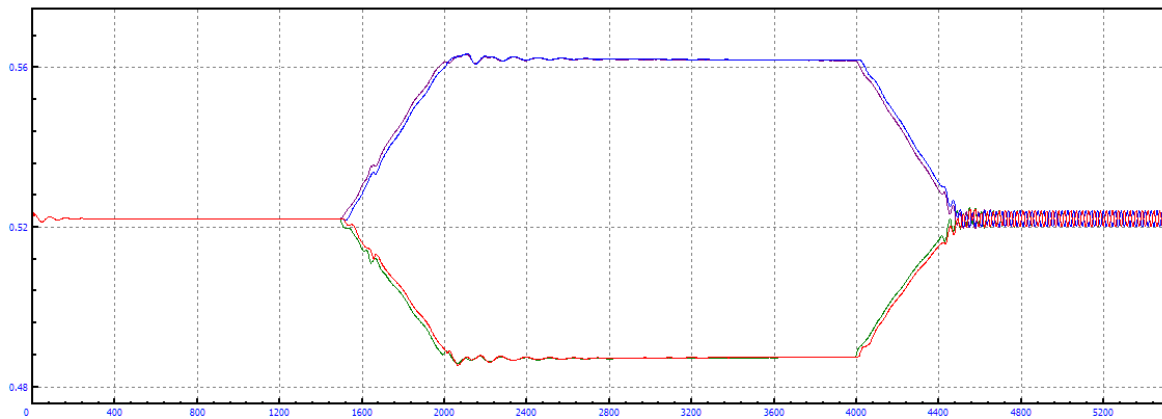


Figura A.368: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=100\text{m/s}$

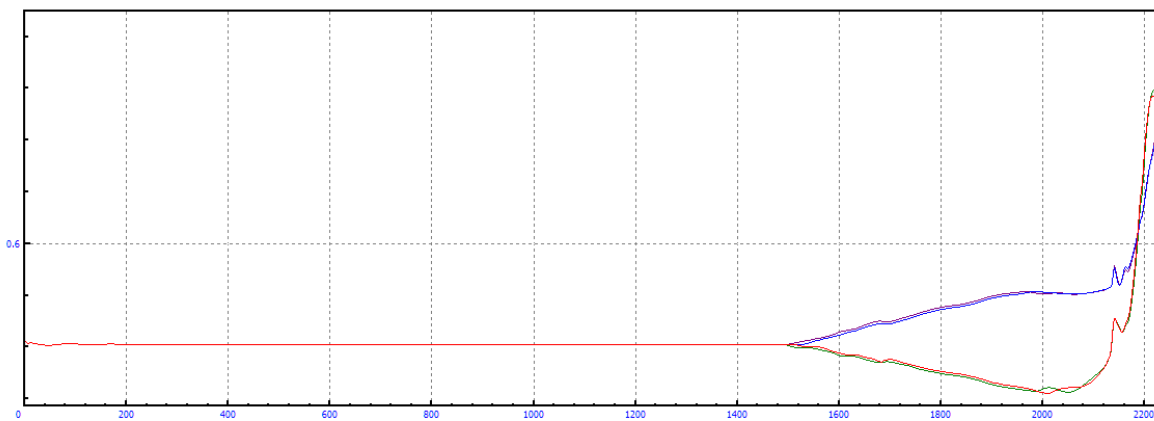


Figura A.369: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=105\text{m/s}$

B.2.9 MODIFICACIÓN=+80%

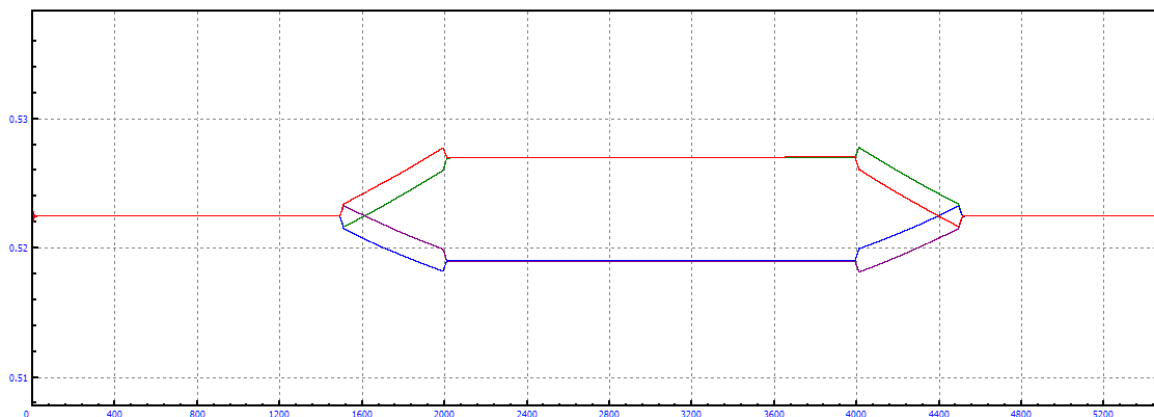


Figura A.370: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria=+80% y V=5m/s

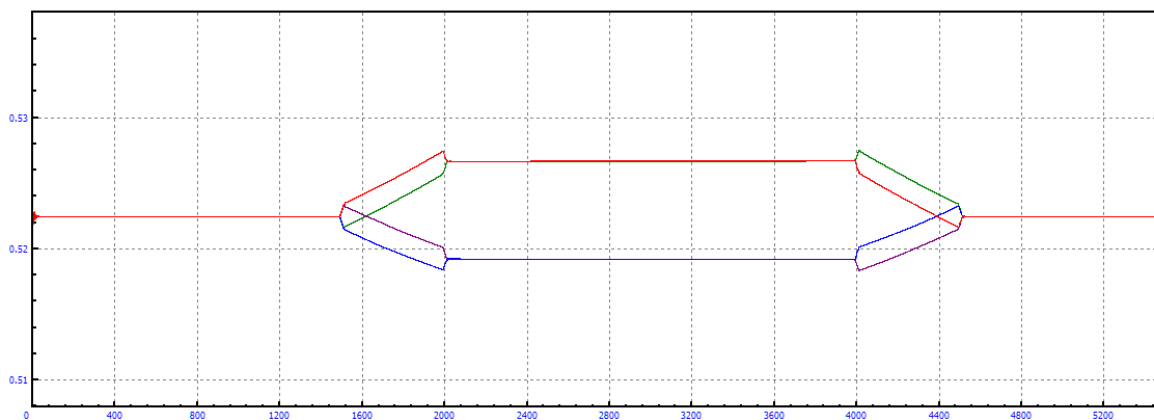


Figura A.371: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria=+80% y V=10m/s

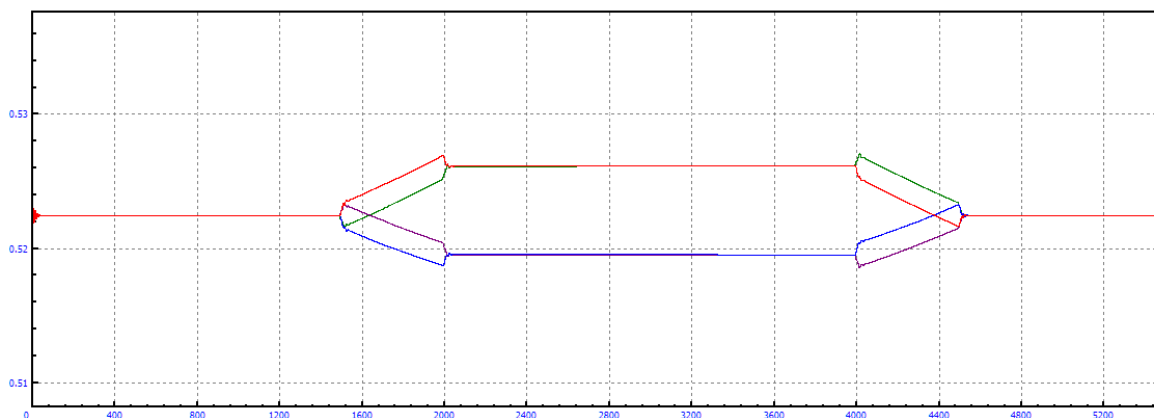


Figura A.372: Longitud amortiguadores en curva R=2km, amortiguación secundaria=+80% y V=15m/s

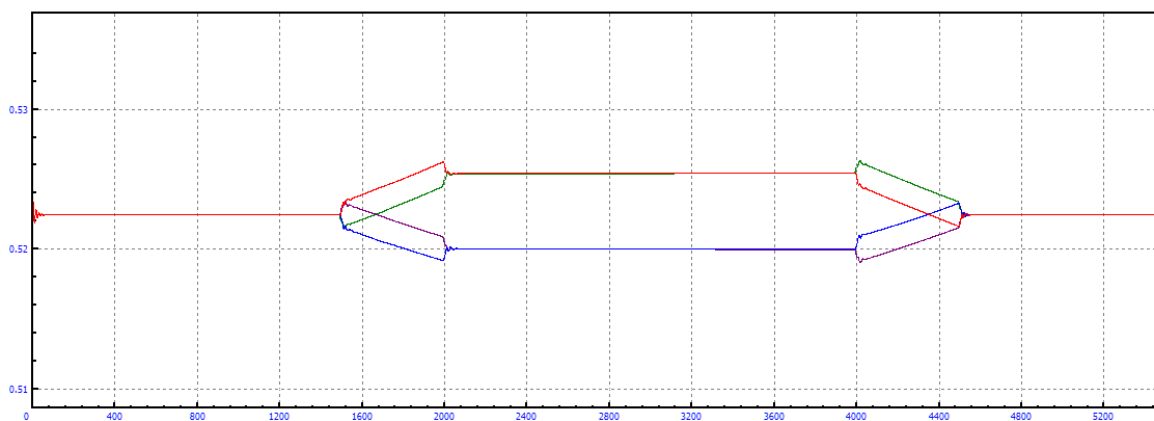


Figura A.373: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=20\text{m/s}$

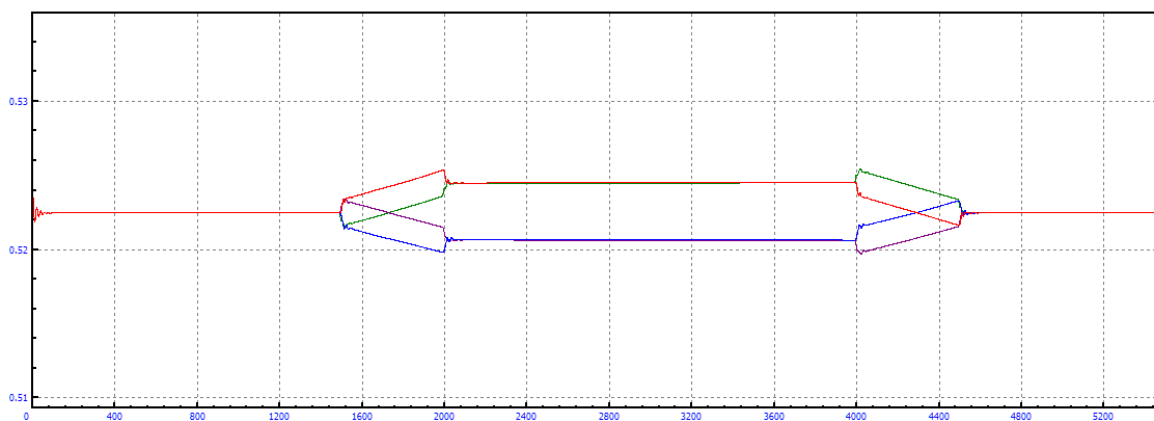


Figura A.374: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=25\text{m/s}$

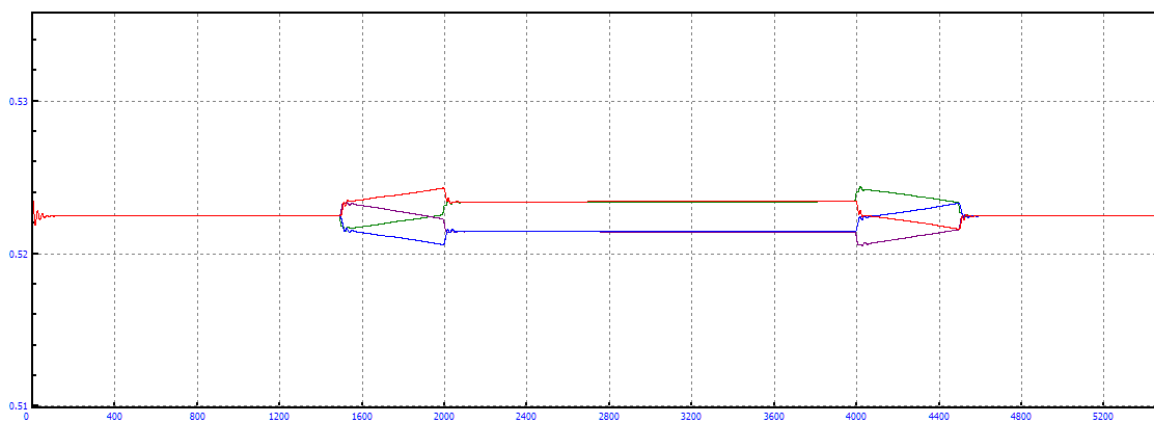


Figura A.375: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=30\text{m/s}$

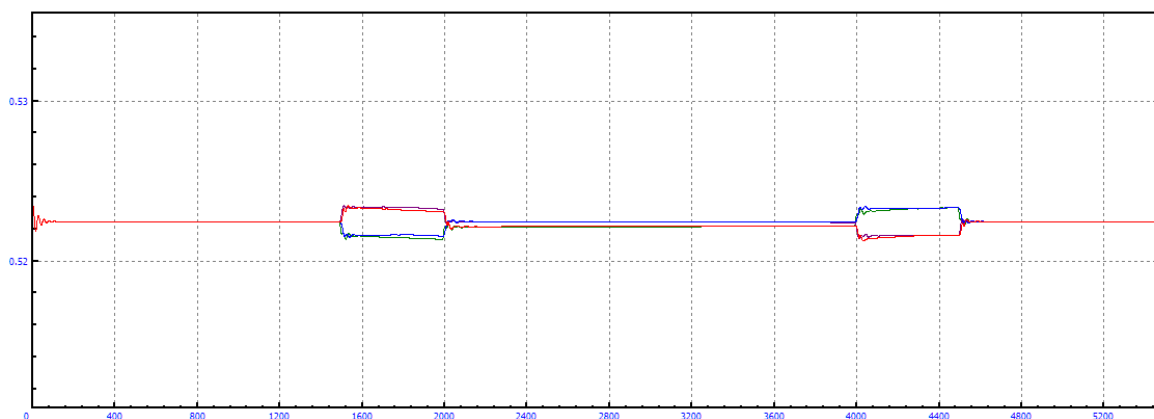


Figura A.376: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=35\text{m/s}$

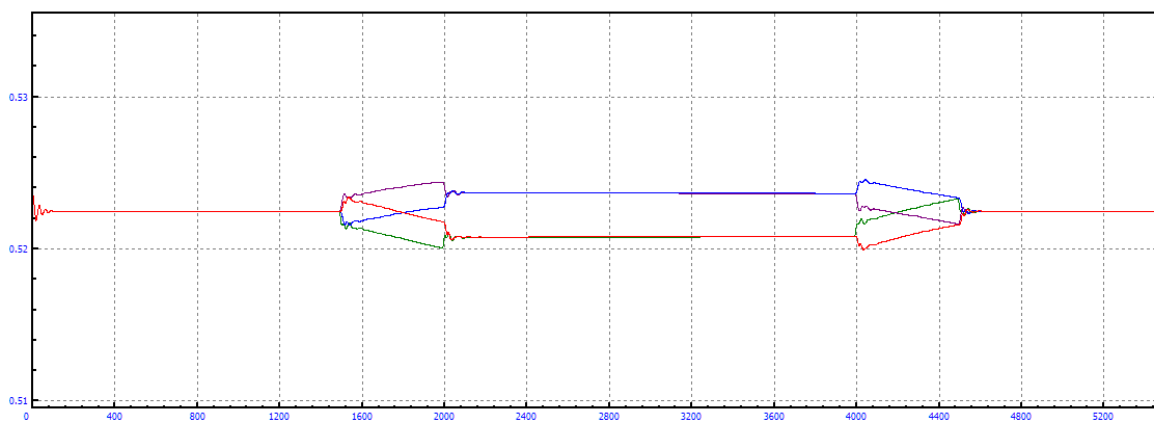


Figura A.377: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=40\text{m/s}$

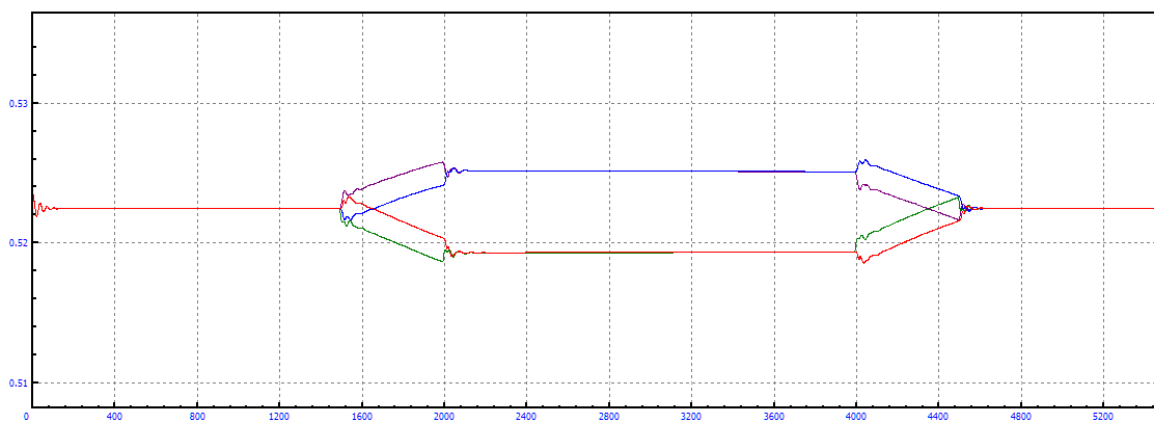


Figura A.378: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=45\text{m/s}$

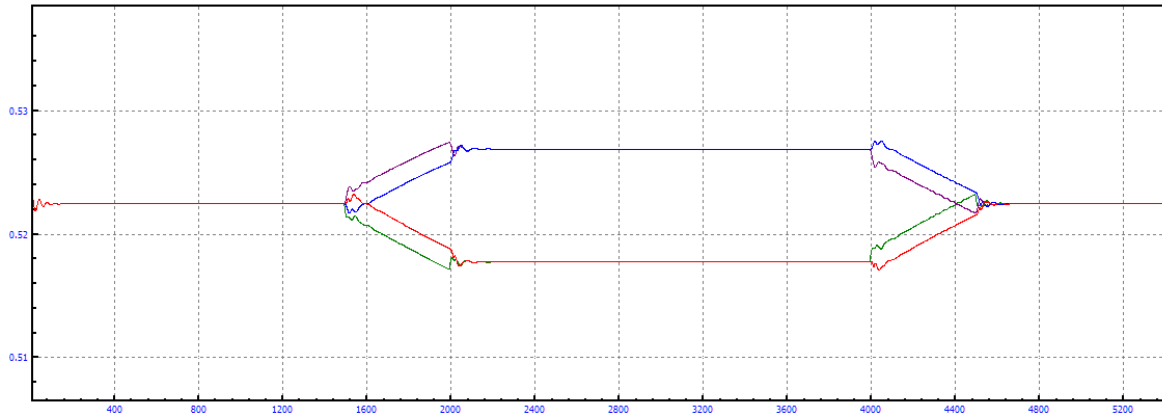


Figura A.379: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=50\text{m/s}$

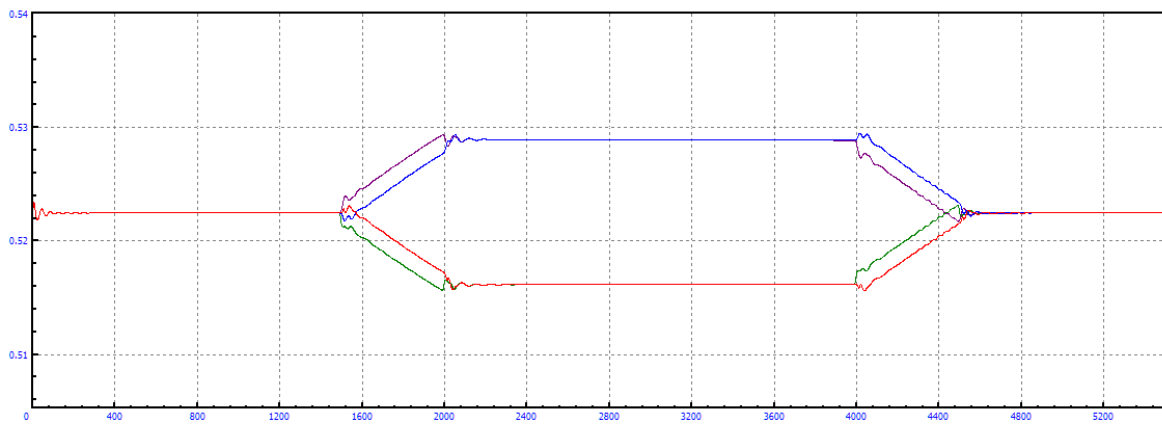


Figura A.380: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=55\text{m/s}$

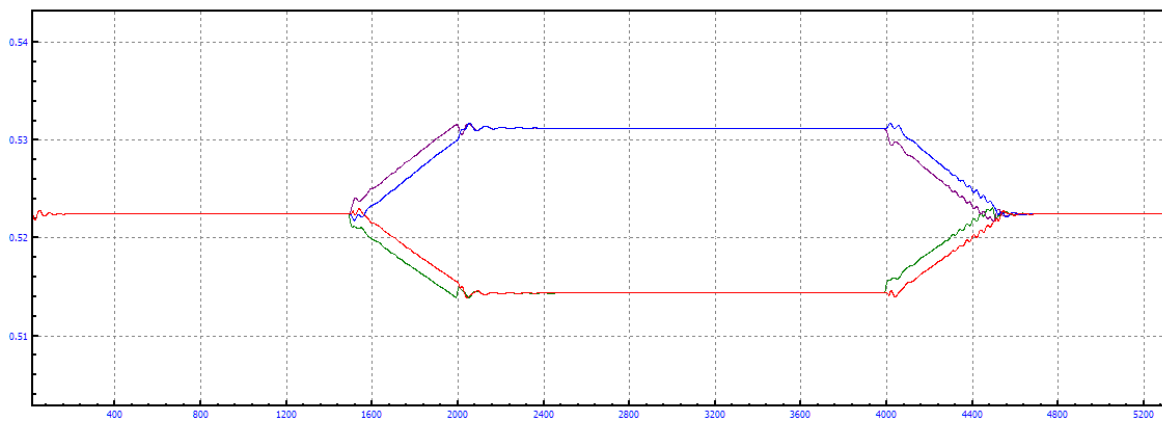


Figura A.381: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=60\text{m/s}$

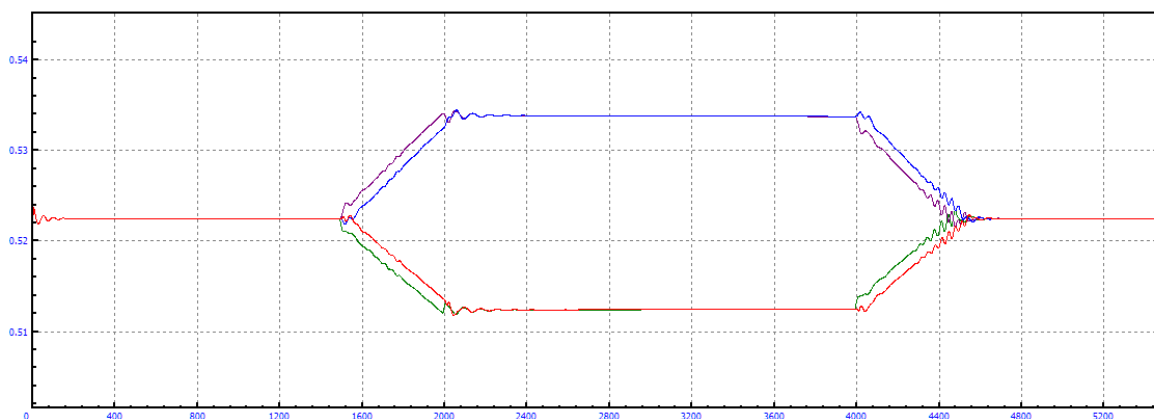


Figura A.382: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=65\text{m/s}$

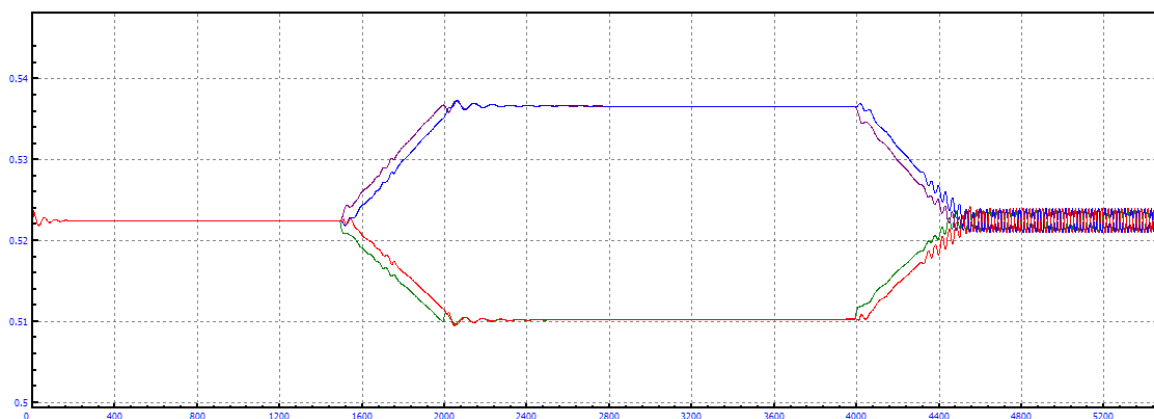


Figura A.383: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=70\text{m/s}$

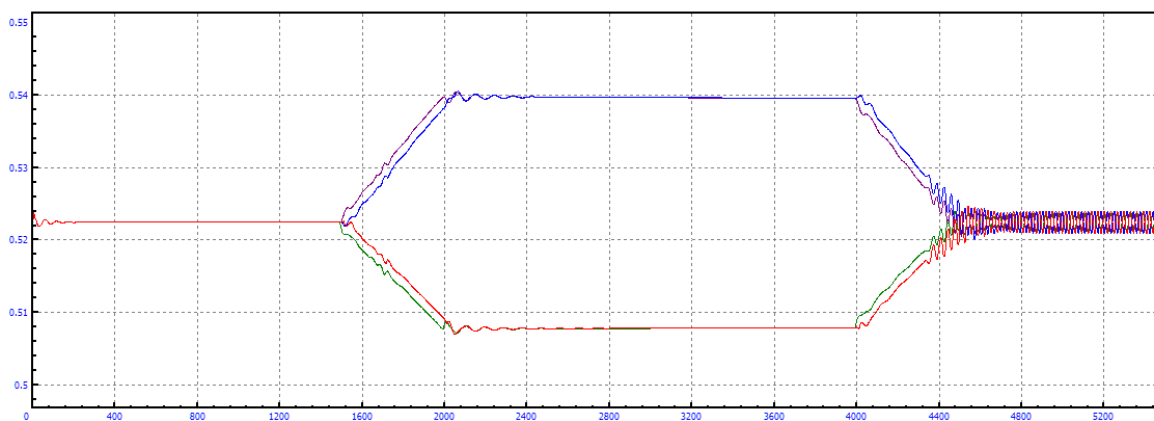


Figura A.384: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=75\text{m/s}$

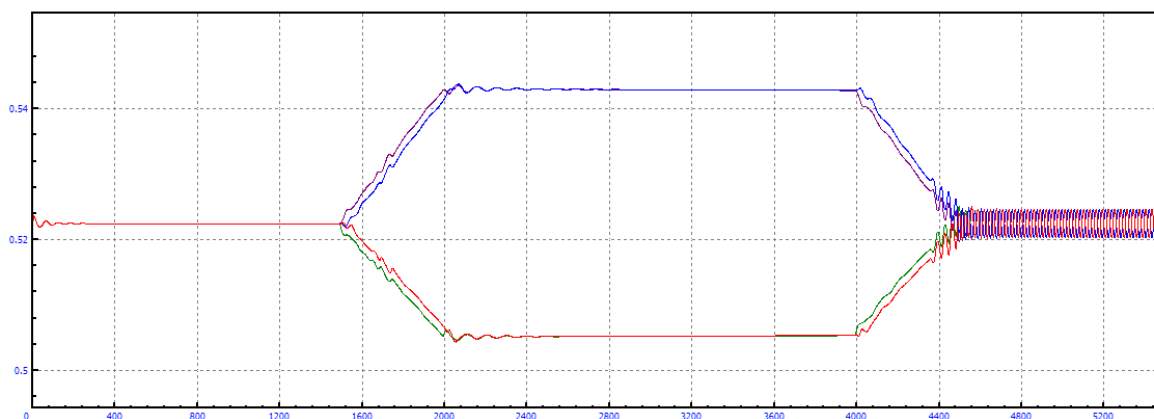


Figura A.385: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=80\text{m/s}$

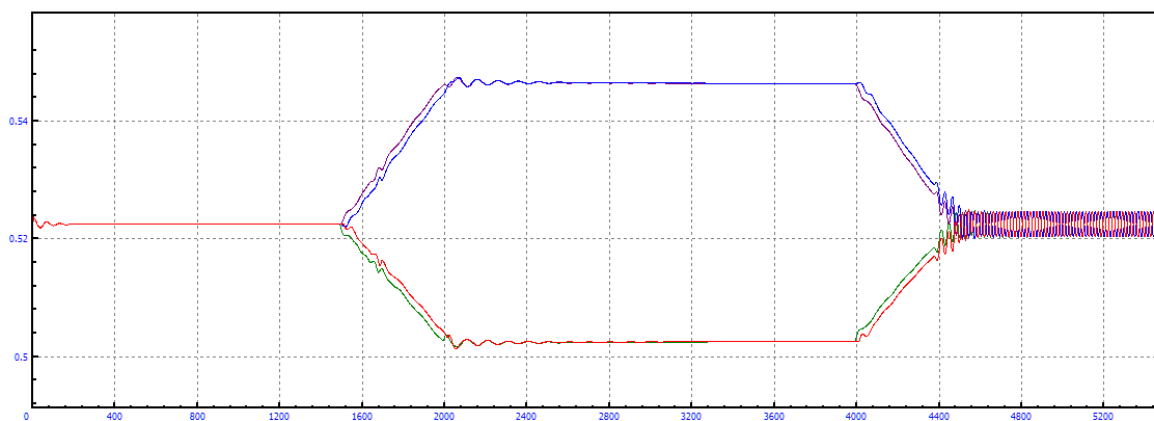


Figura A.386: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=85\text{m/s}$

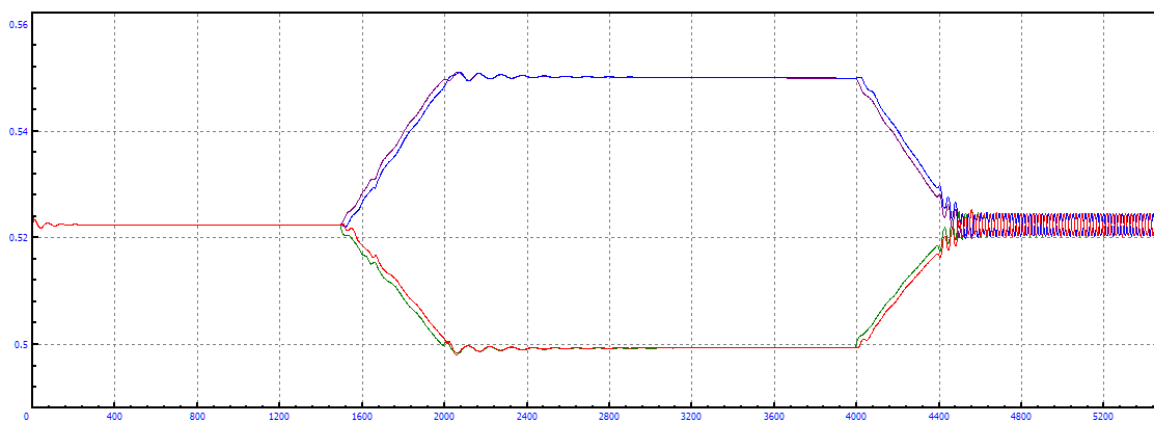


Figura A.387: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=90\text{m/s}$

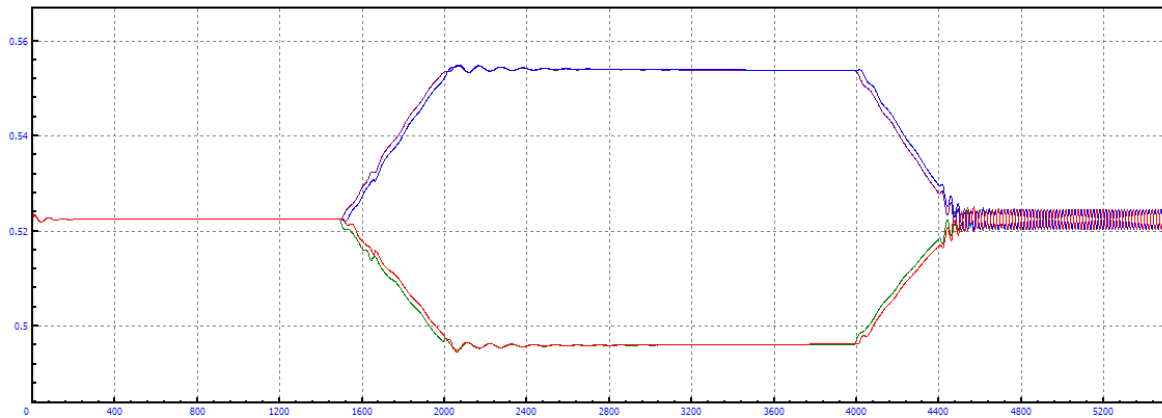


Figura A.388: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=95\text{m/s}$

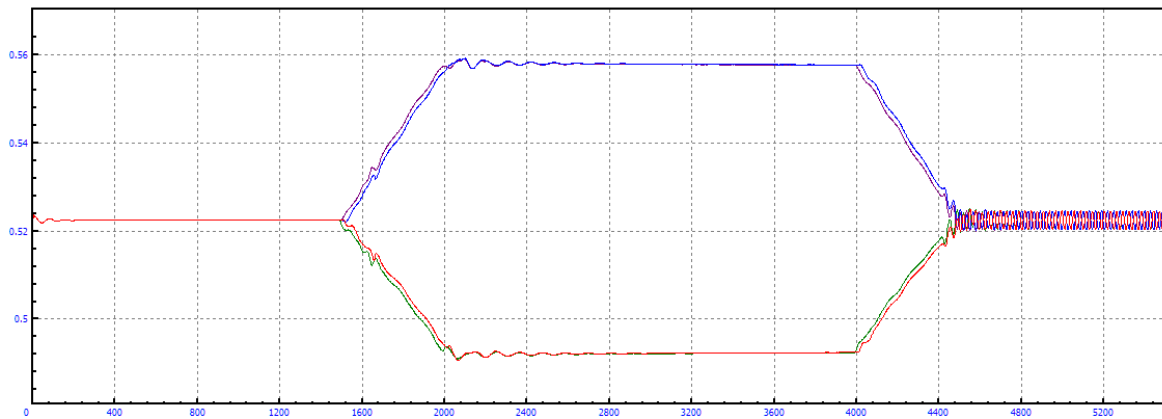


Figura A.389: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=100\text{m/s}$



Figura A.390: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=105\text{m/s}$

B.2.10 MODIFICACIÓN=+100%

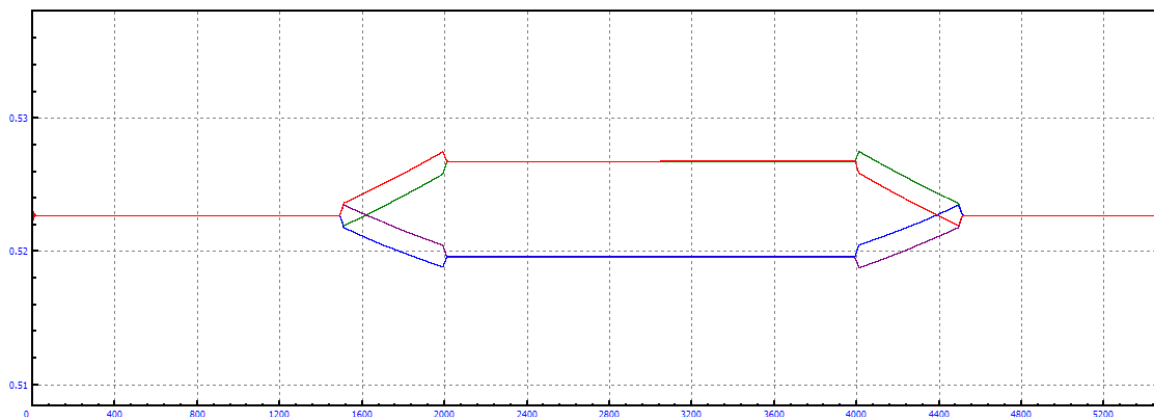


Figura A.391: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=5\text{m/s}$

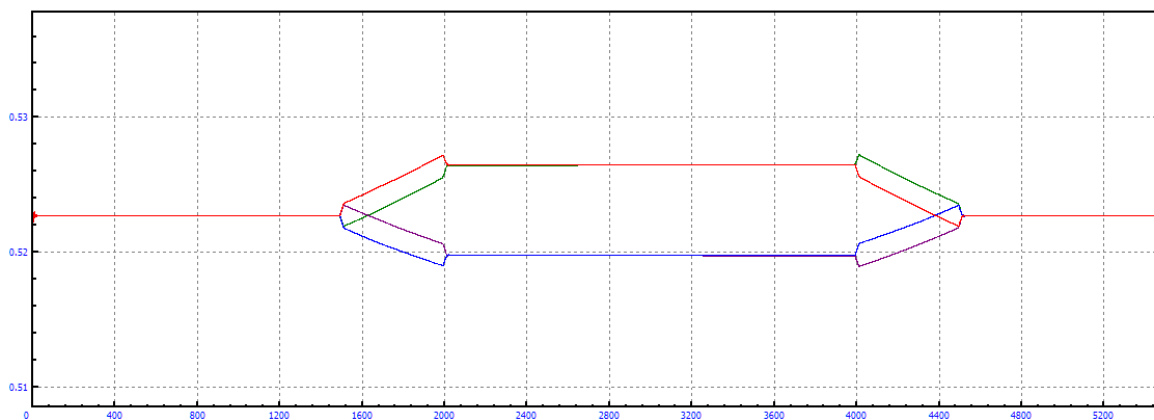


Figura A.392: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=10\text{m/s}$

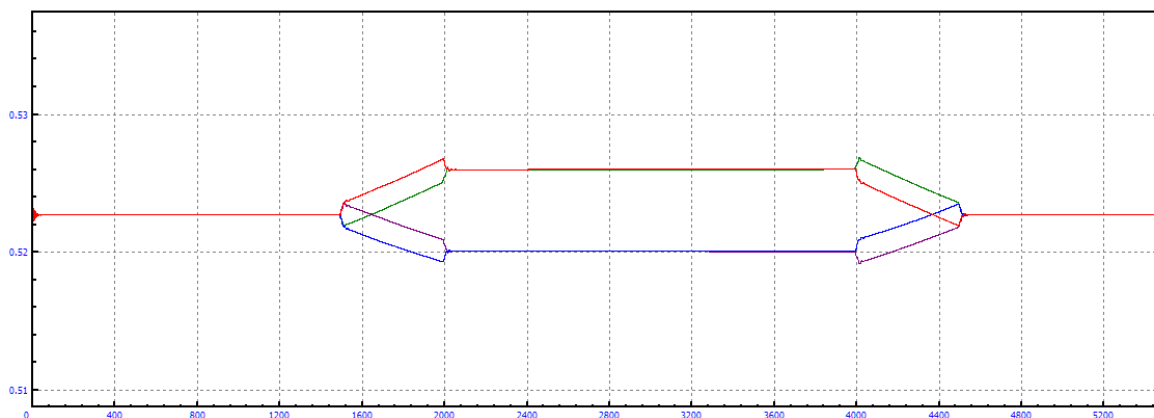


Figura A.393: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=15\text{m/s}$

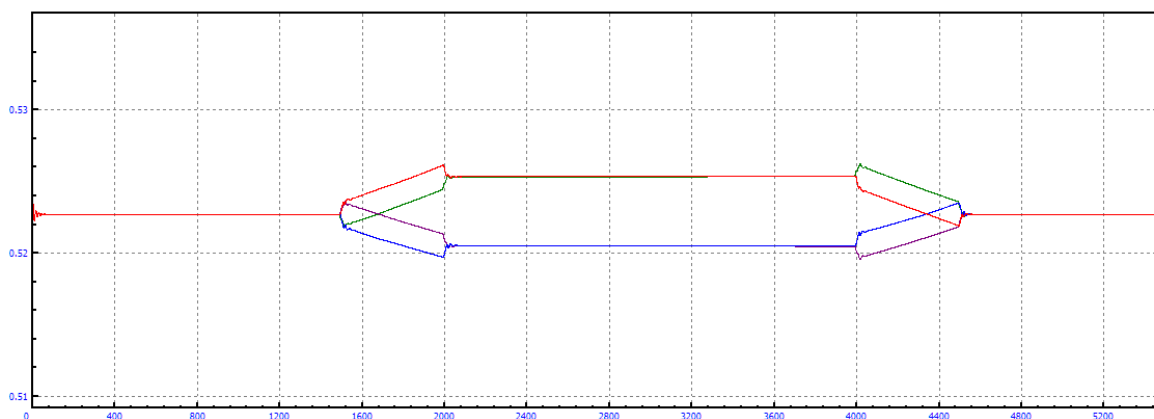


Figura A.394: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=20\text{m/s}$

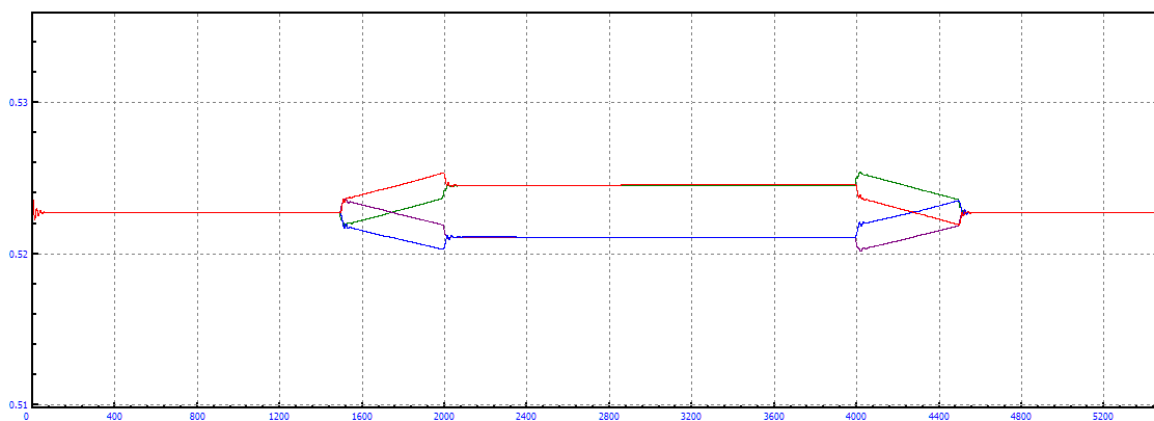


Figura A.395: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=25\text{m/s}$

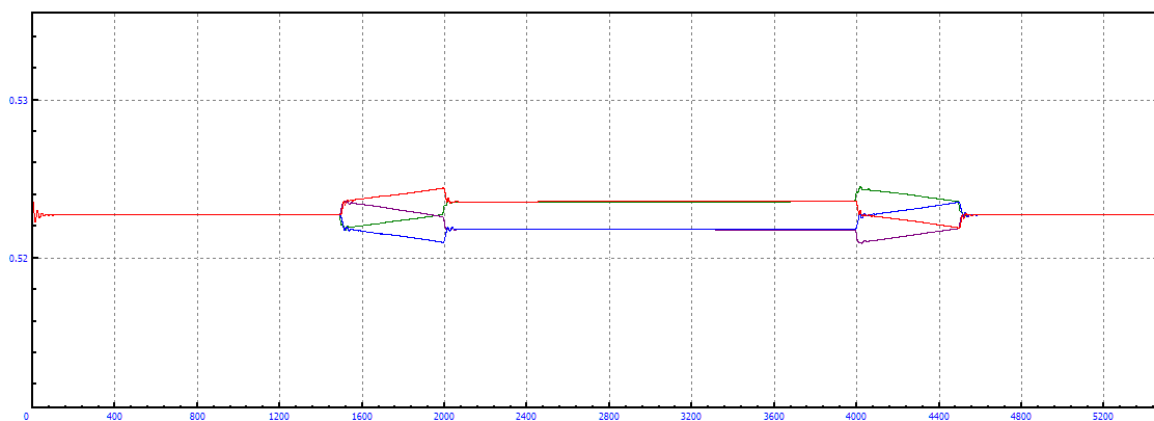


Figura A.396: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=30\text{m/s}$

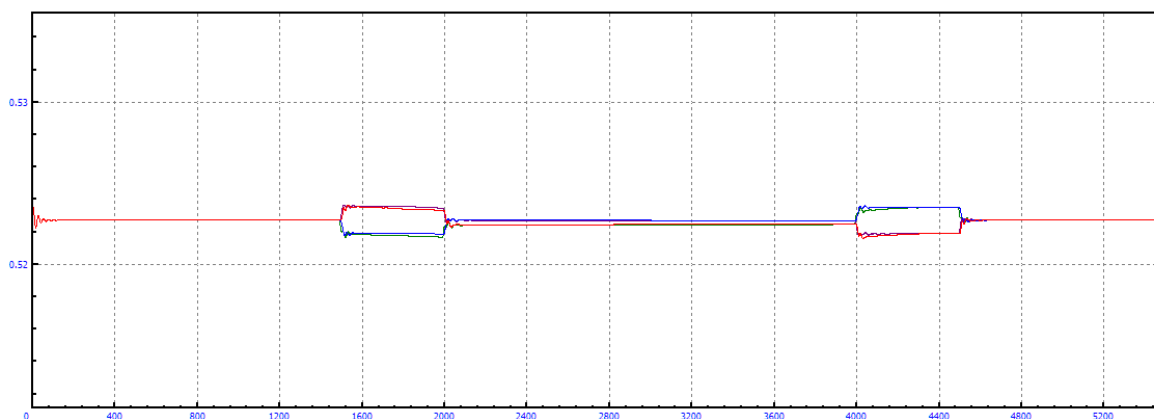


Figura A.397: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=35\text{m/s}$

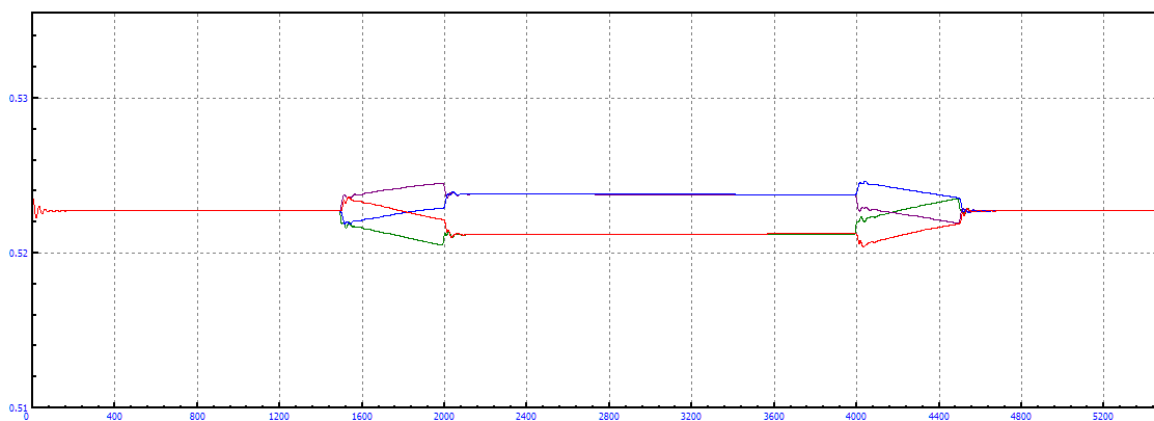


Figura A.398: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=40\text{m/s}$

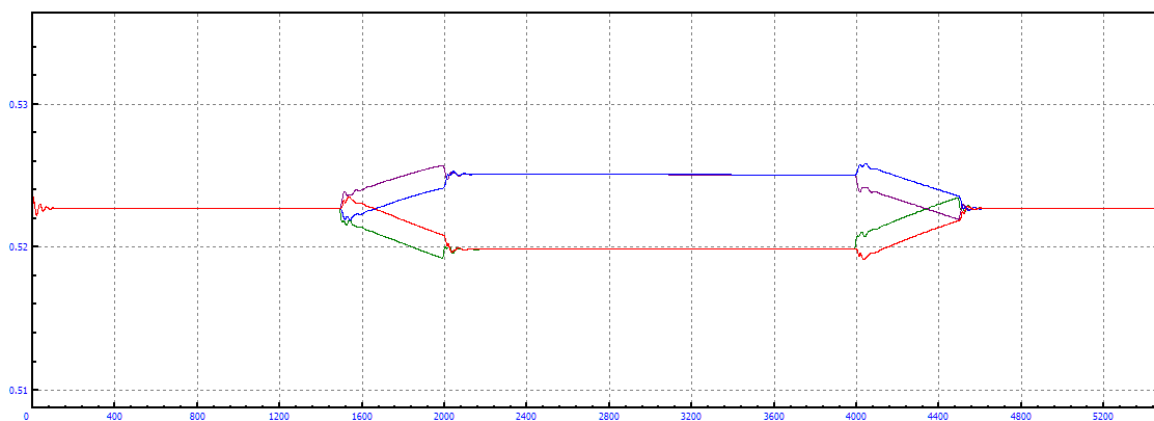


Figura A.399: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=45\text{m/s}$

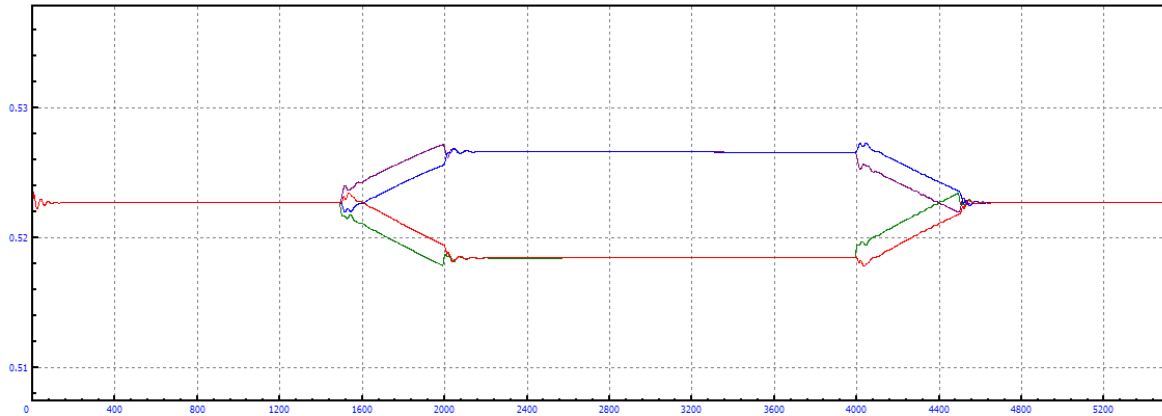


Figura A.400: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=50\text{m/s}$

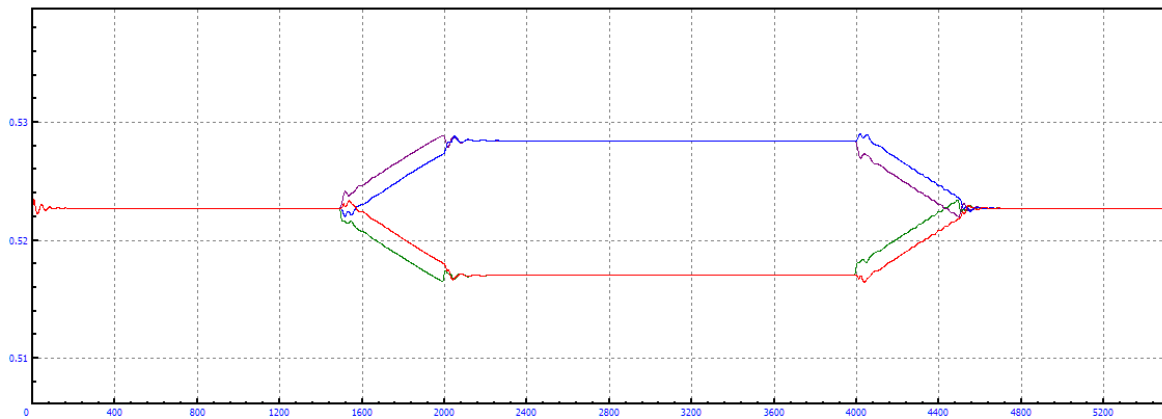


Figura A.401: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=55\text{m/s}$

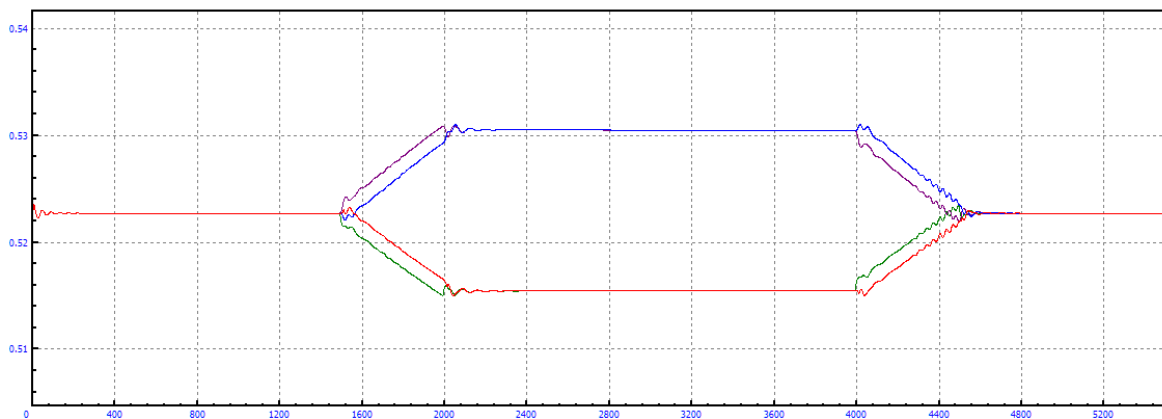


Figura A.402: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=60\text{m/s}$

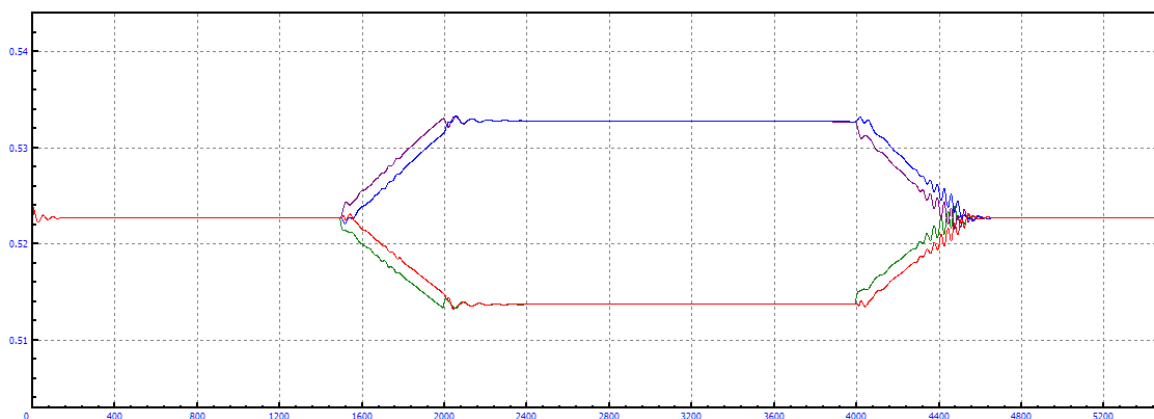


Figura A.403: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=65\text{m/s}$

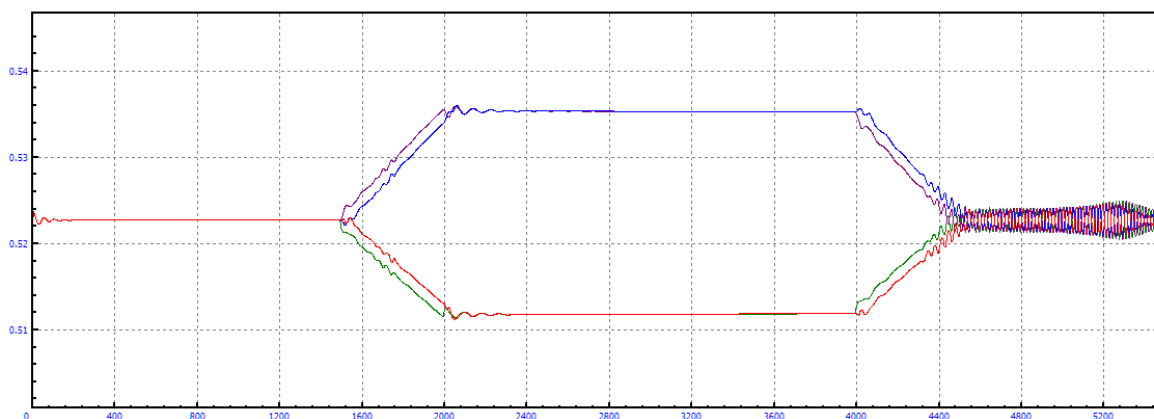


Figura A.404: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=70\text{m/s}$

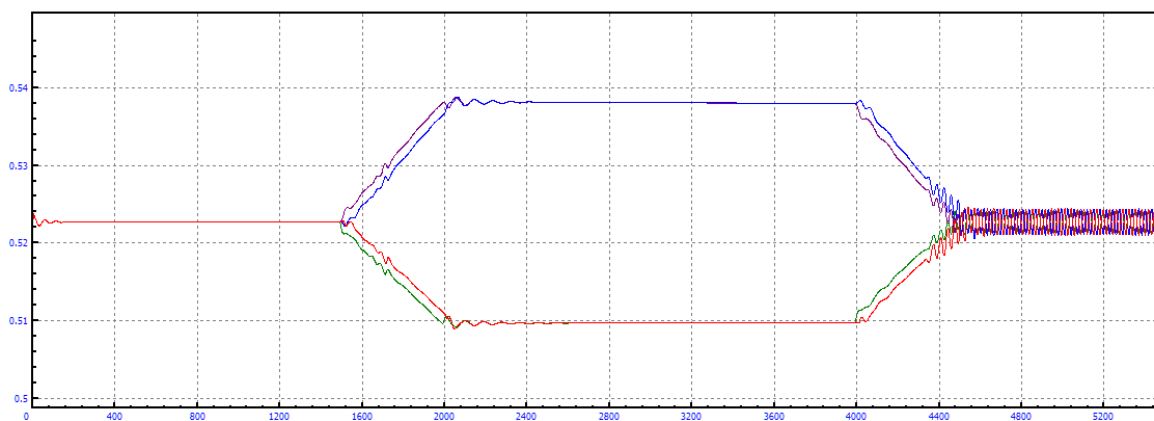


Figura A.405: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=75\text{m/s}$

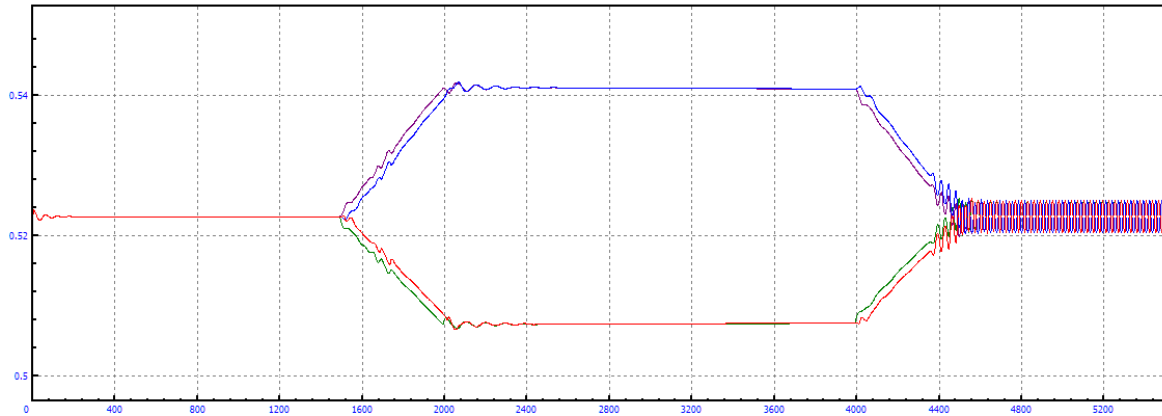


Figura A.406: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=80\text{m/s}$

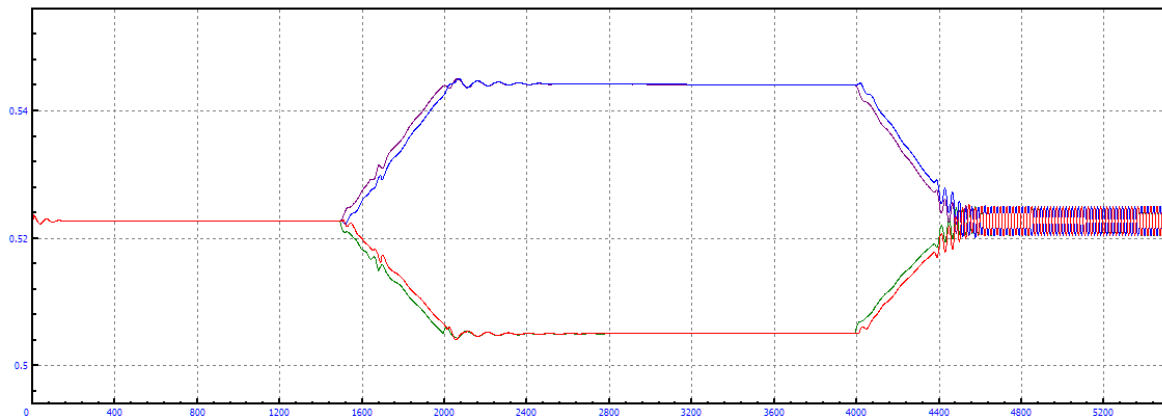


Figura A.407: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=85\text{m/s}$

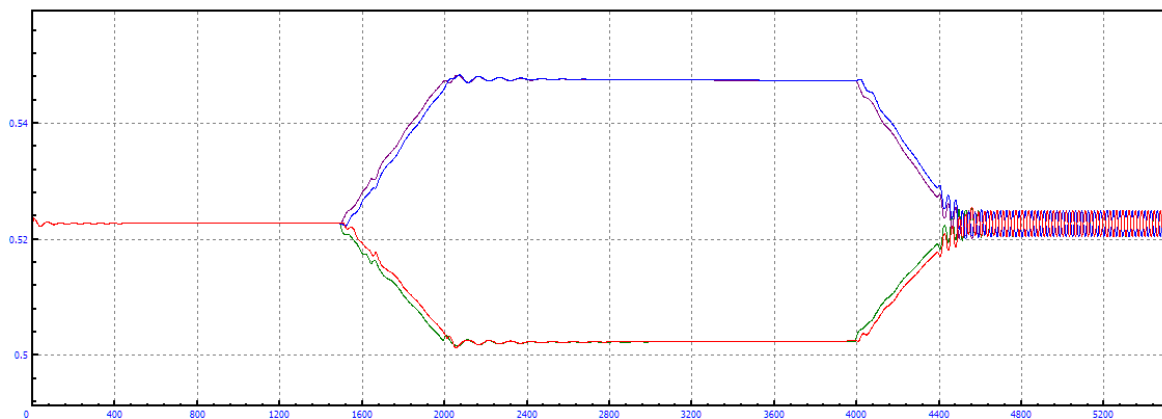


Figura A.408: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=90\text{m/s}$

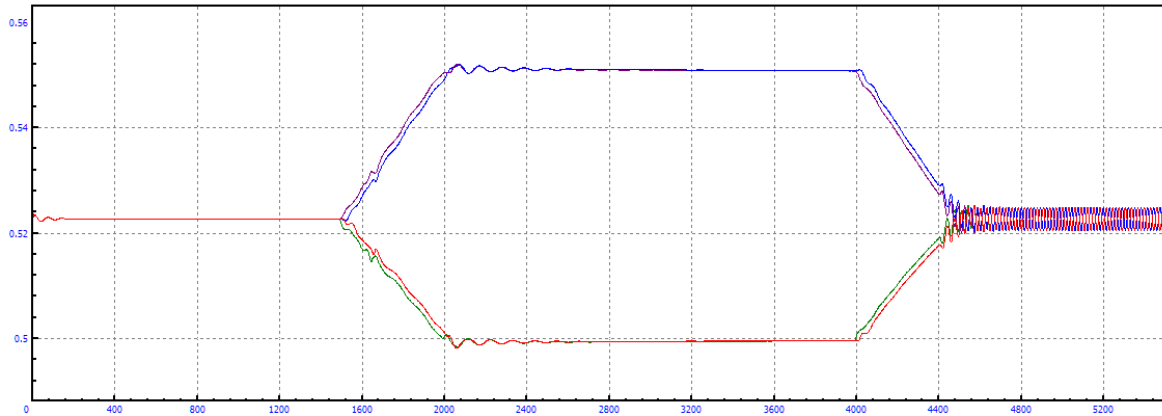


Figura A.409: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=95\text{m/s}$

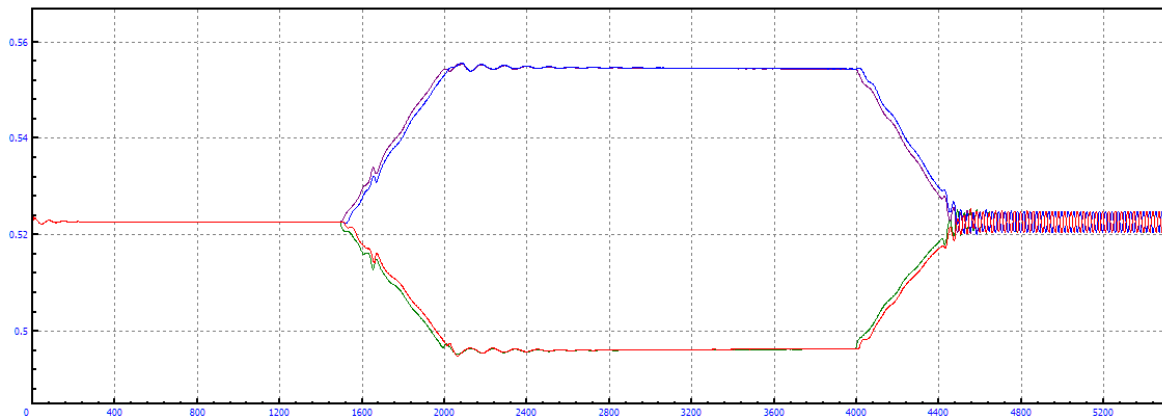


Figura A.410: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=100\text{m/s}$

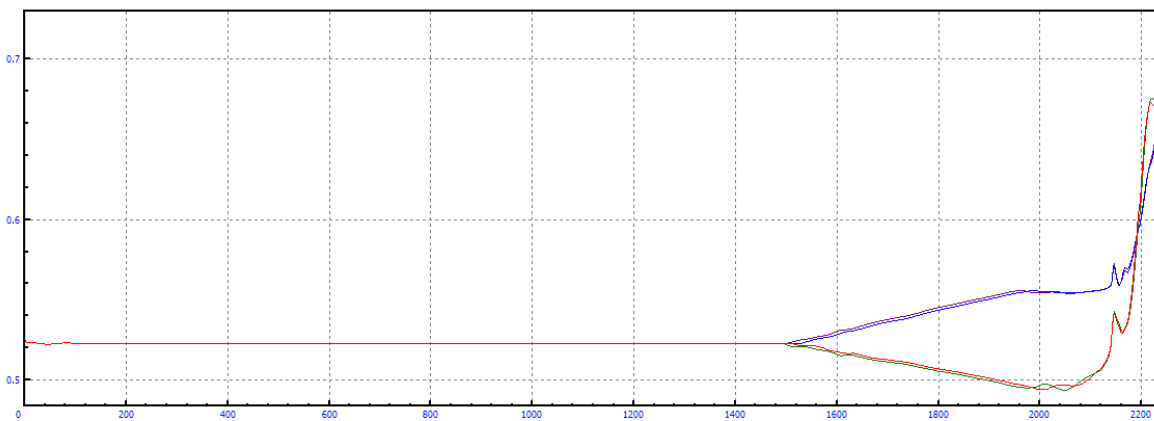


Figura A.411: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=105\text{m/s}$

B.3 RADIO 5KM

B.3.1 MODIFICACIÓN=-80%

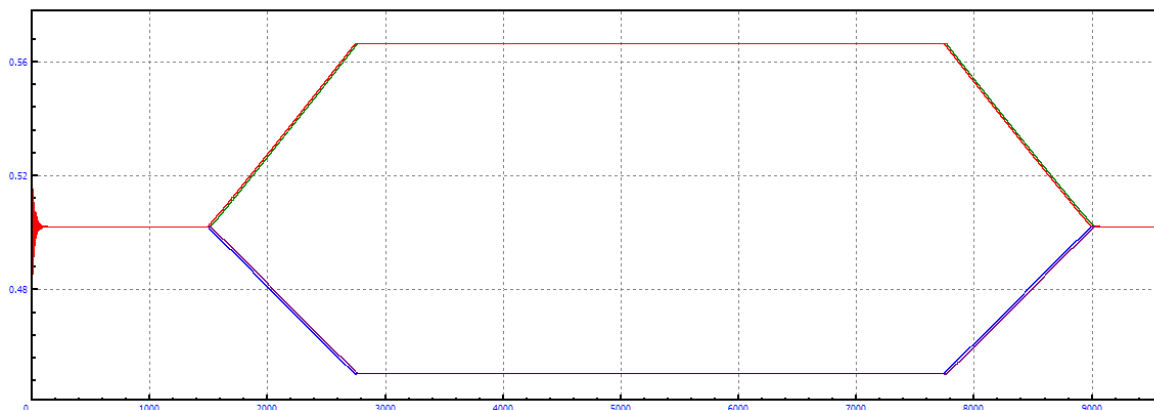


Figura A.412: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=5\text{m/s}$

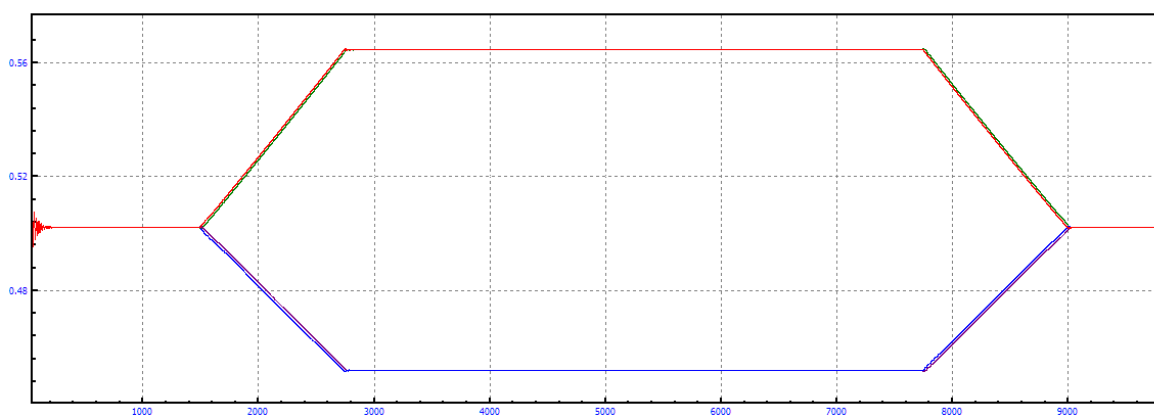


Figura A.413: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=10\text{m/s}$

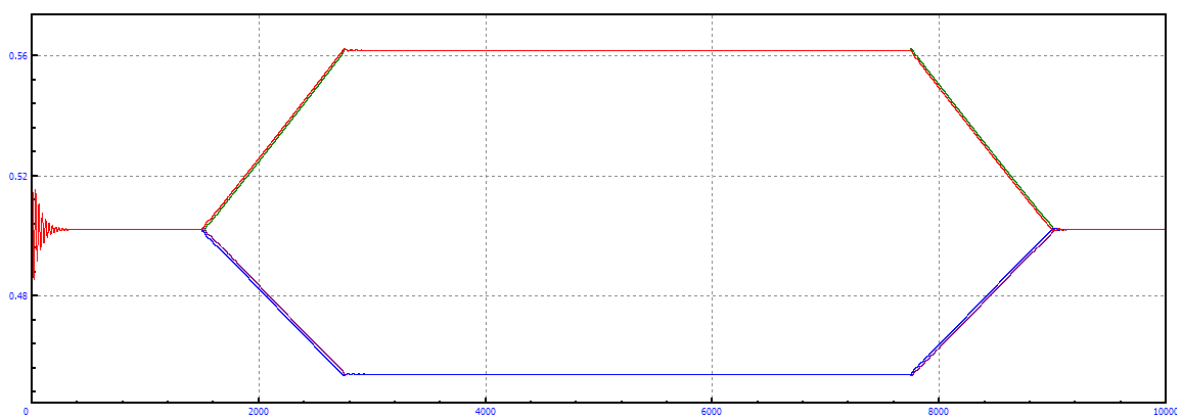


Figura A.414: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=15\text{m/s}$

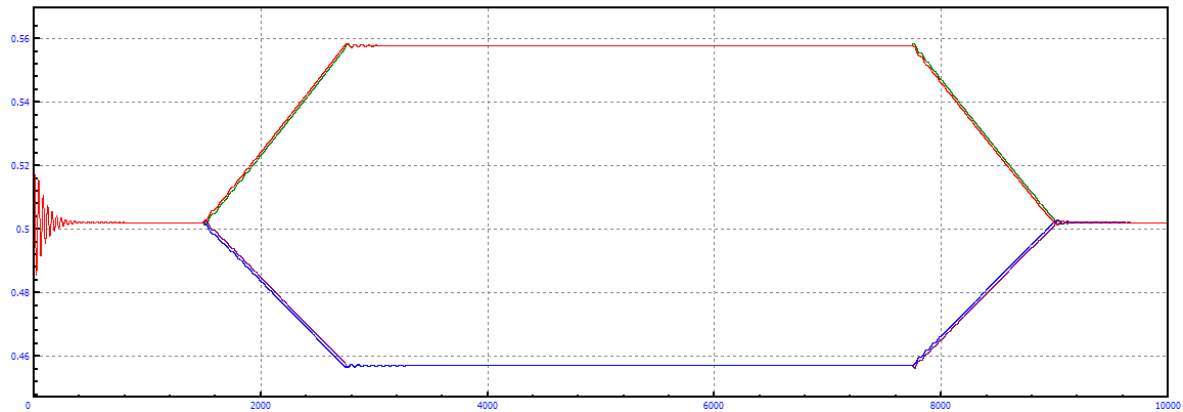


Figura A.415: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=20\text{m/s}$

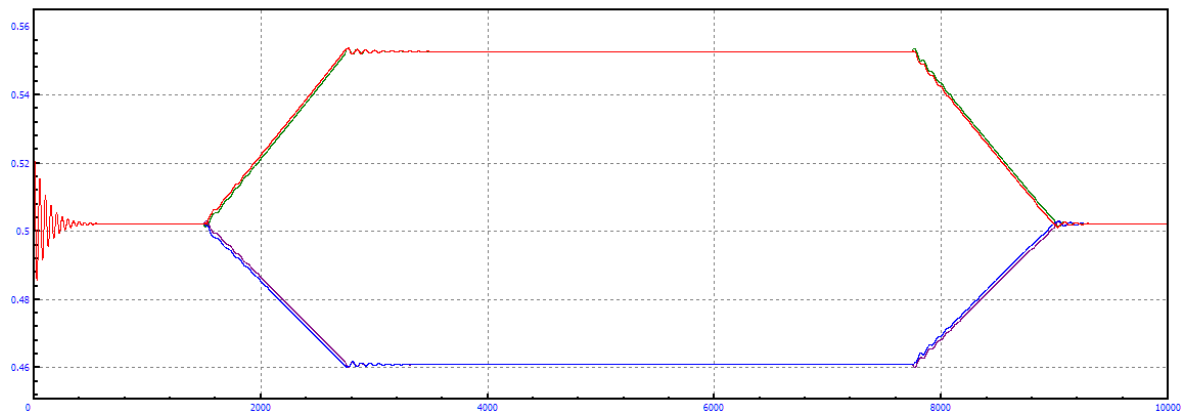


Figura A.416: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=25\text{m/s}$

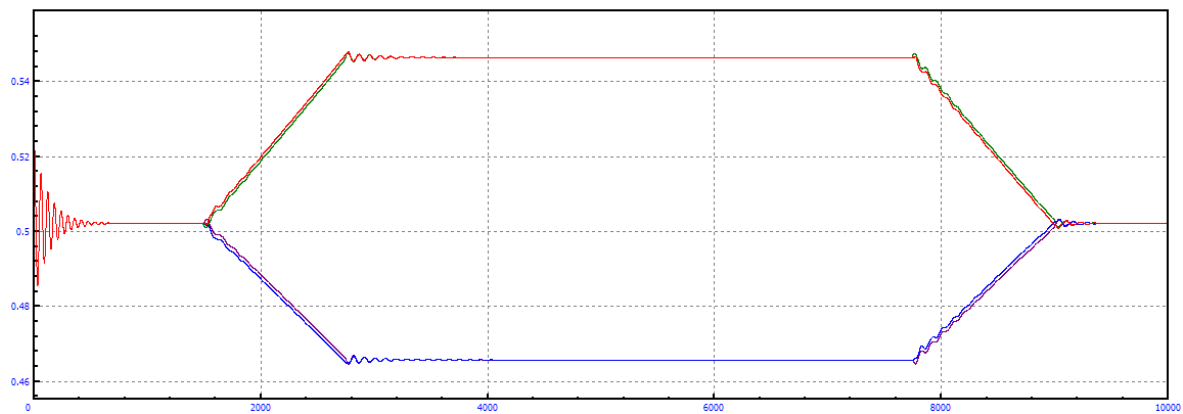


Figura A.417: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=30\text{m/s}$

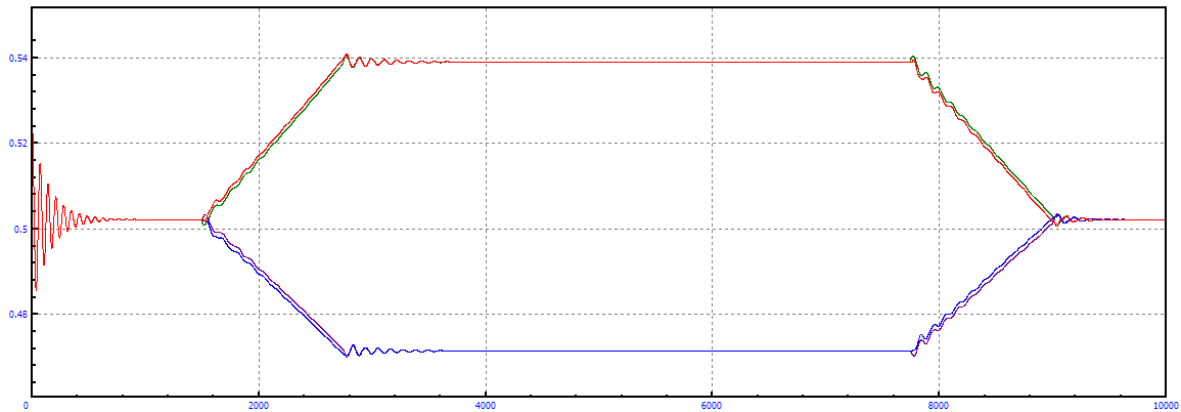


Figura A.418: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-80% y V=35m/s

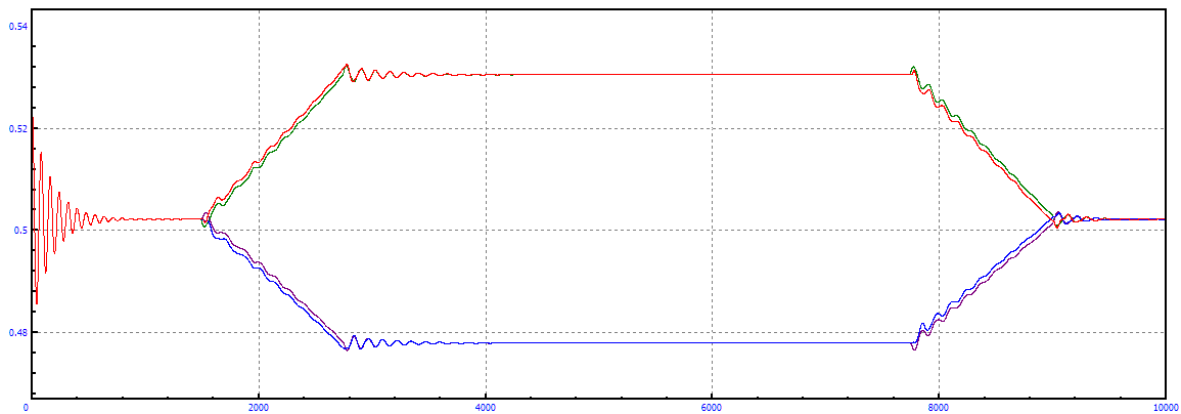


Figura A.419: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-80% y V=40m/s

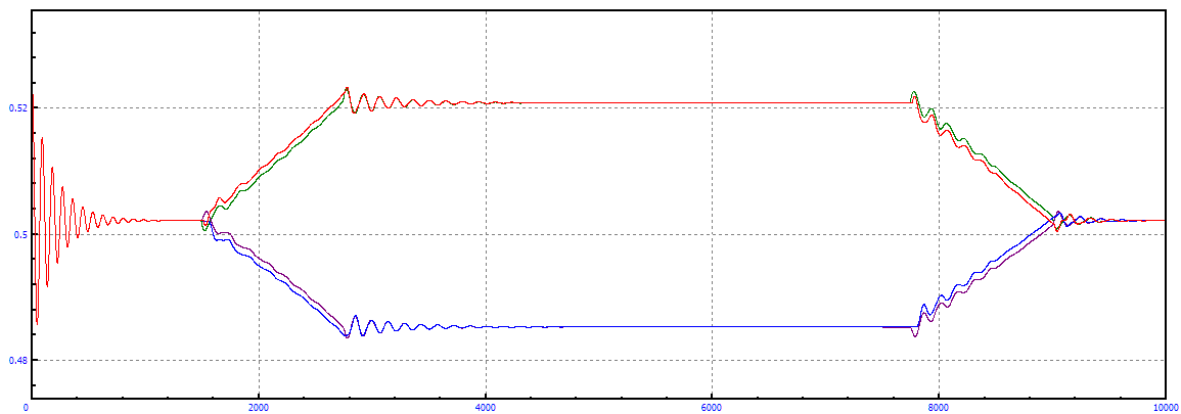


Figura A.420: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-80% y V=45m/s

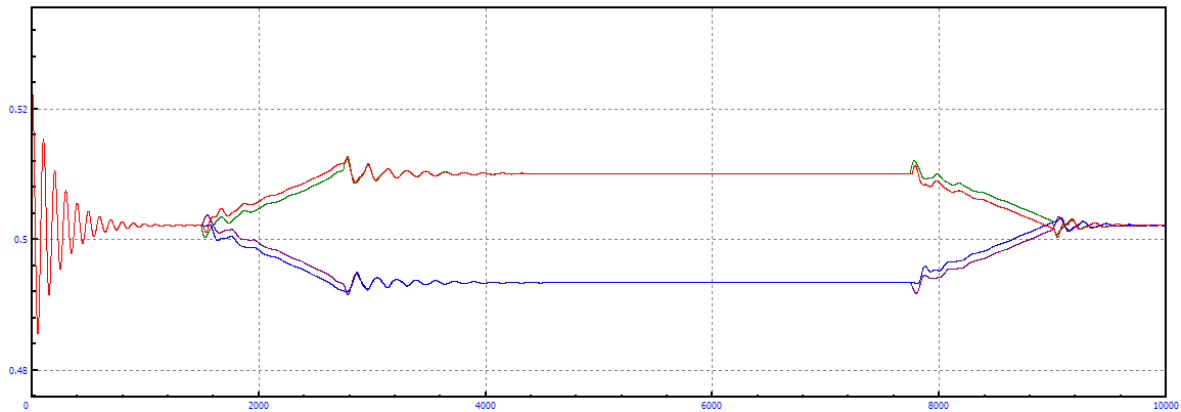


Figura A.421: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=50\text{m/s}$

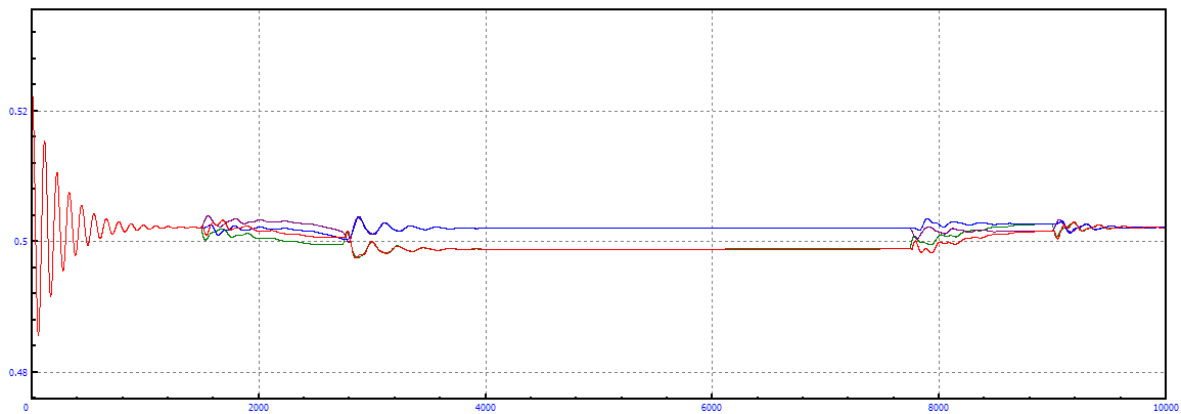


Figura A.422: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=55\text{m/s}$

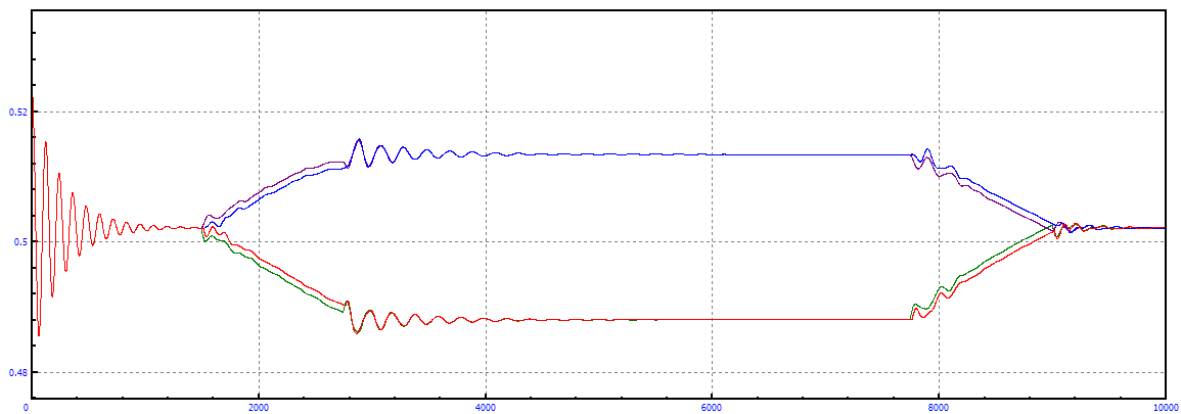


Figura A.423: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=60\text{m/s}$

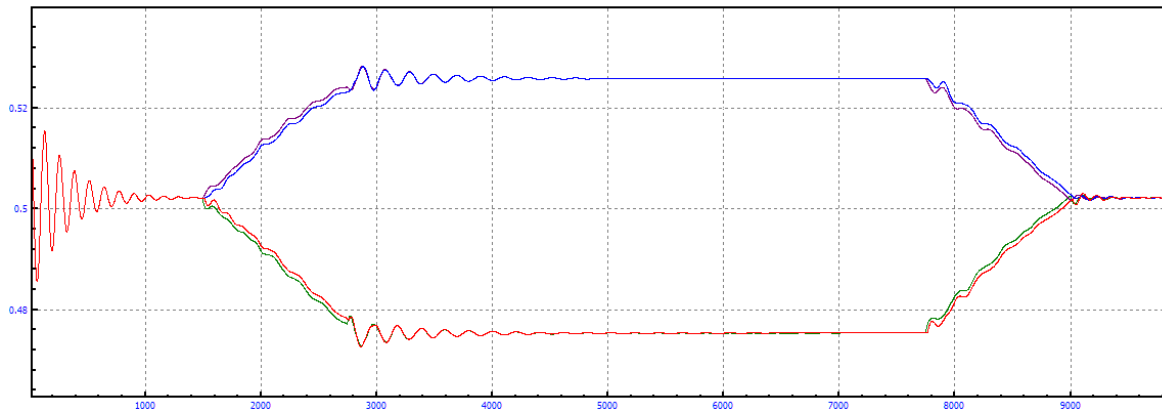


Figura A.424: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=-80\%$ y $V=65\text{m/s}$

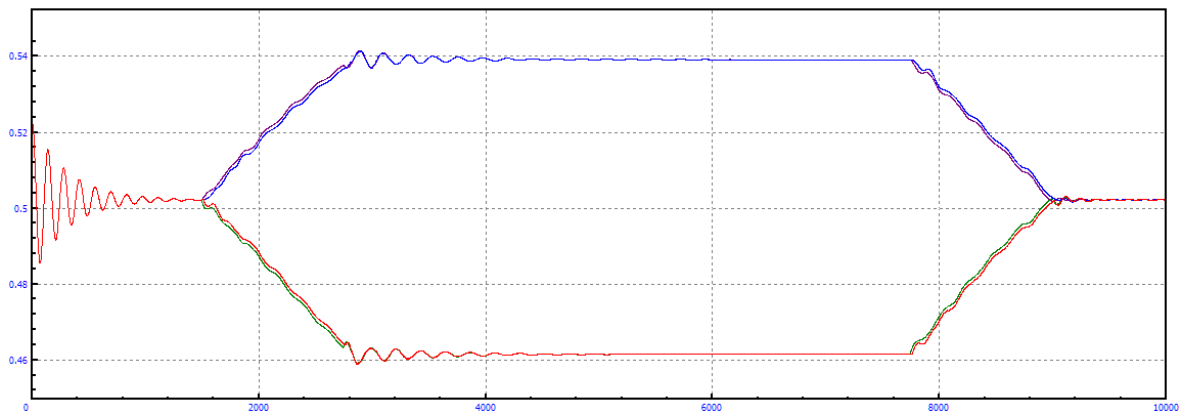


Figura A.425: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=-80\%$ y $V=70\text{m/s}$

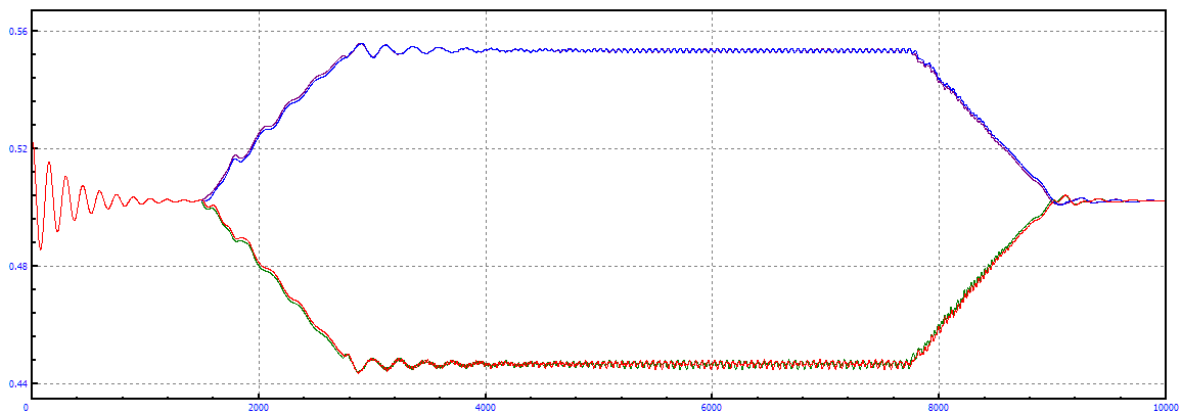


Figura A.426: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=-80\%$ y $V=75\text{m/s}$

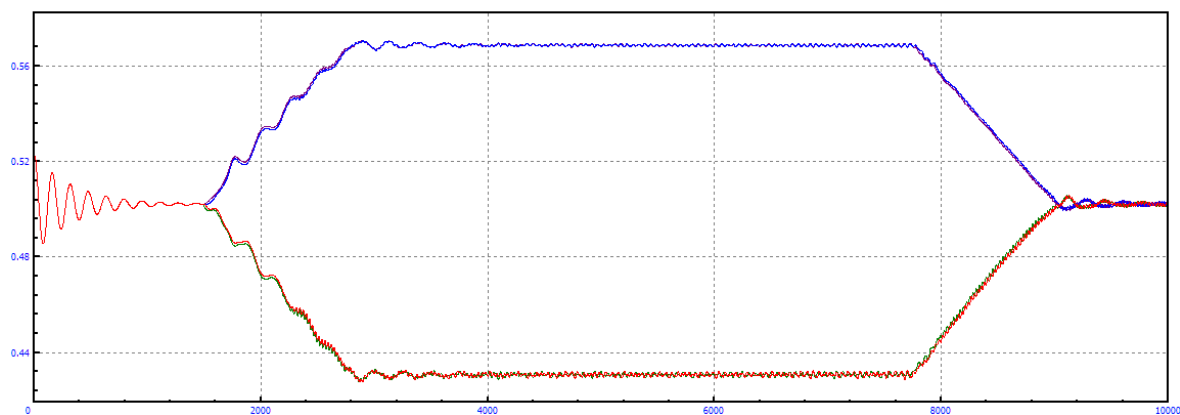


Figura A.427: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=80\text{m/s}$

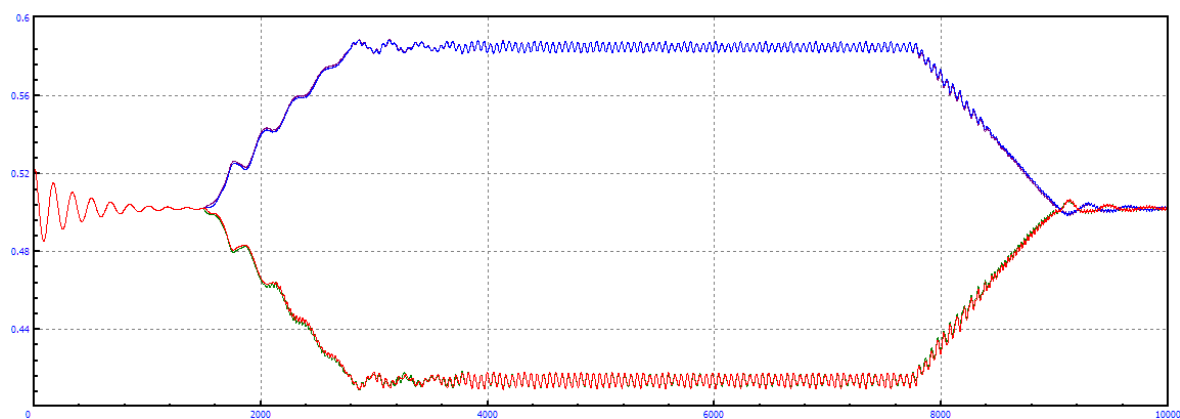


Figura A.428: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=85\text{m/s}$

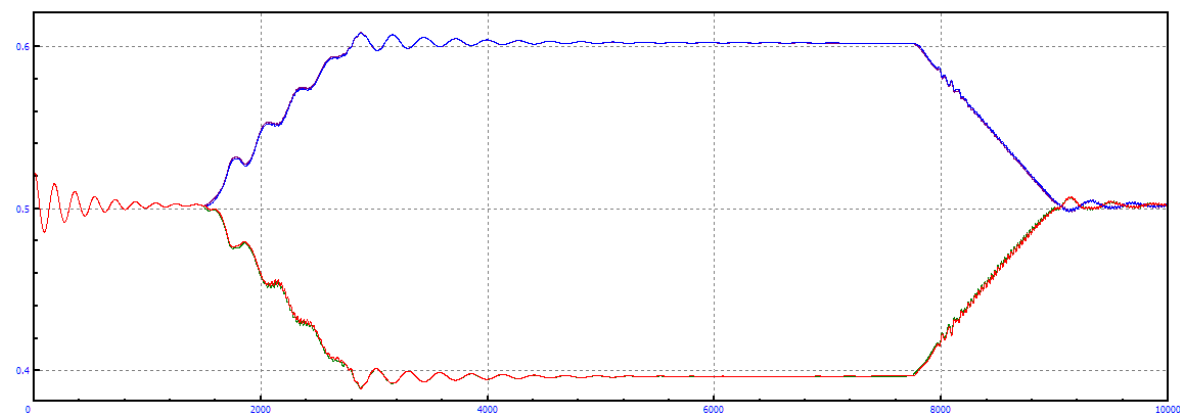


Figura A.429: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=90\text{m/s}$

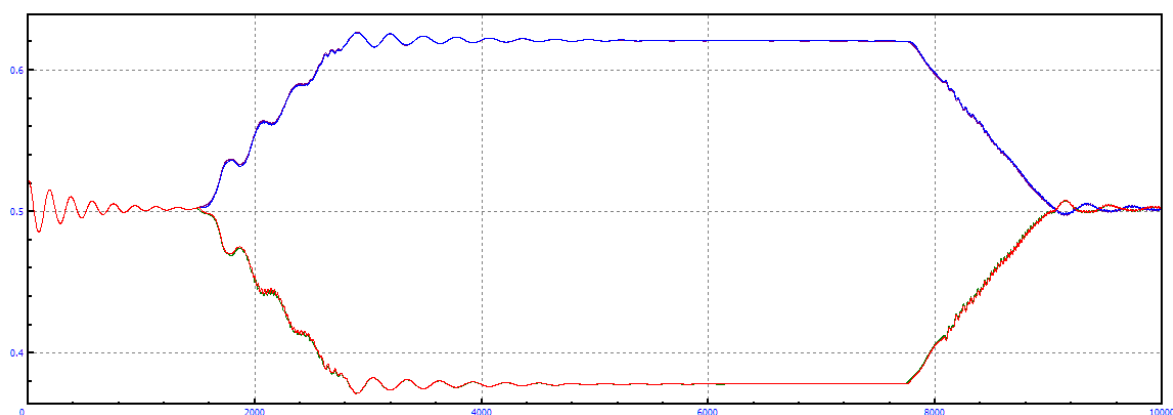


Figura A.430: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=95\text{m/s}$

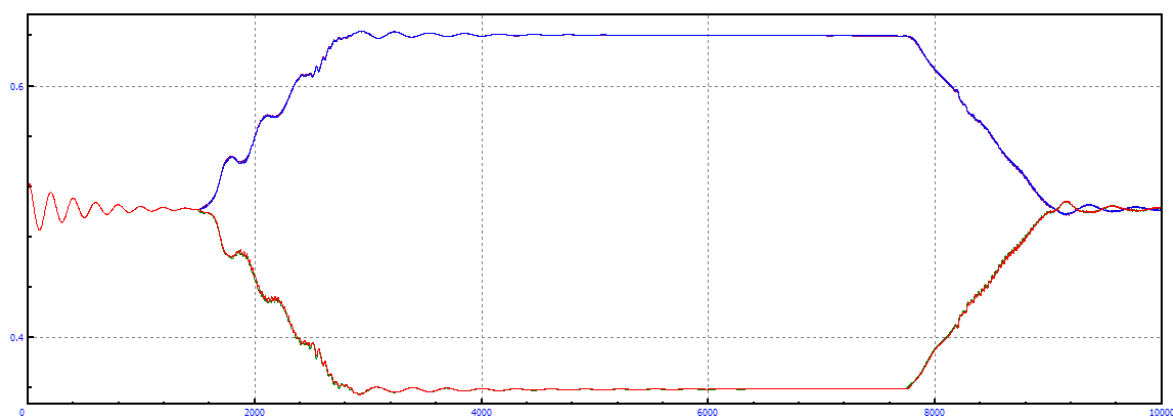


Figura A.431: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=100\text{m/s}$

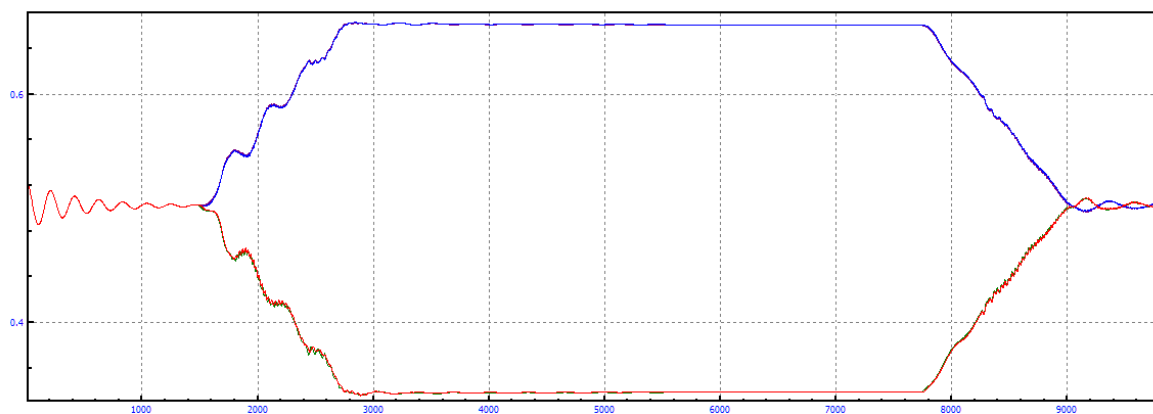


Figura A.432: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=105\text{m/s}$

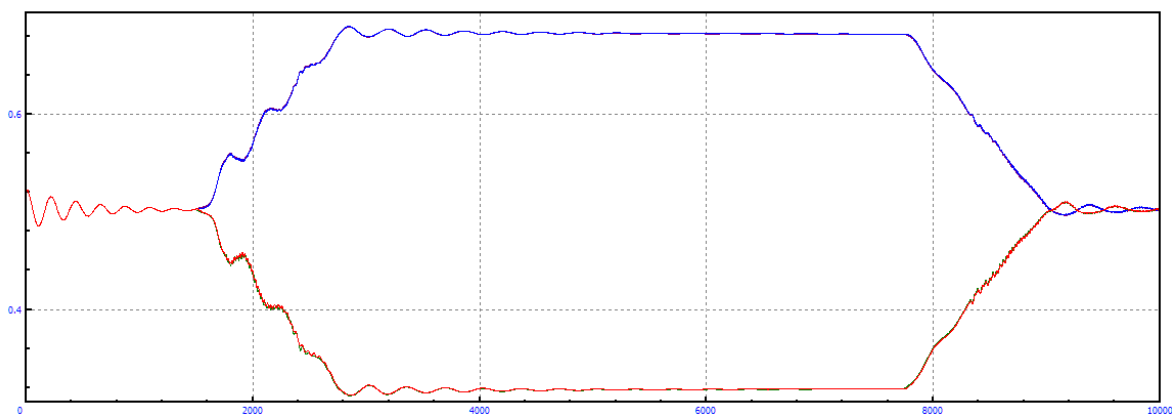


Figura A.433: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=110\text{m/s}$

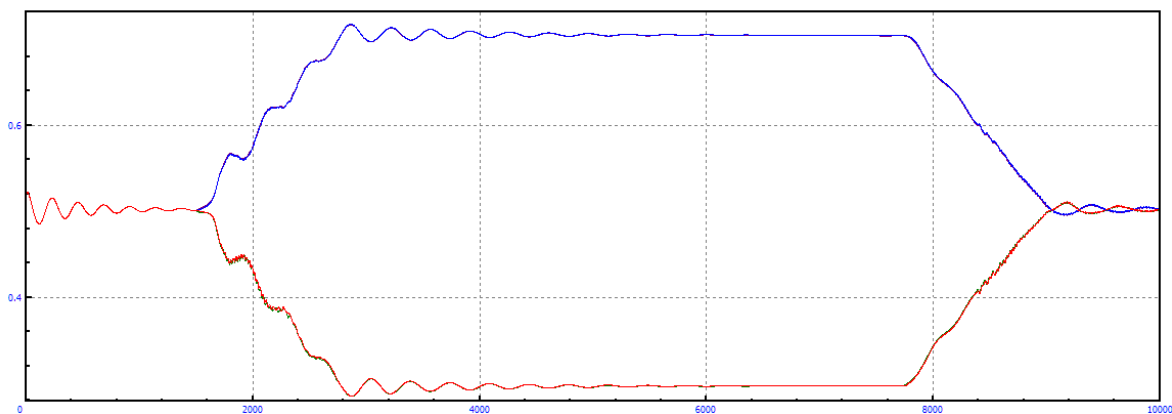


Figura A.434: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=115\text{m/s}$

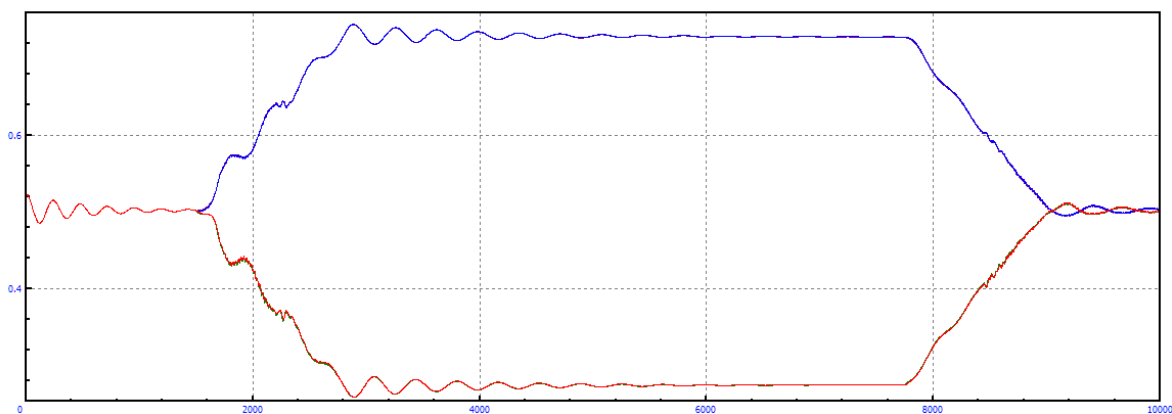


Figura A.435: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=120\text{m/s}$

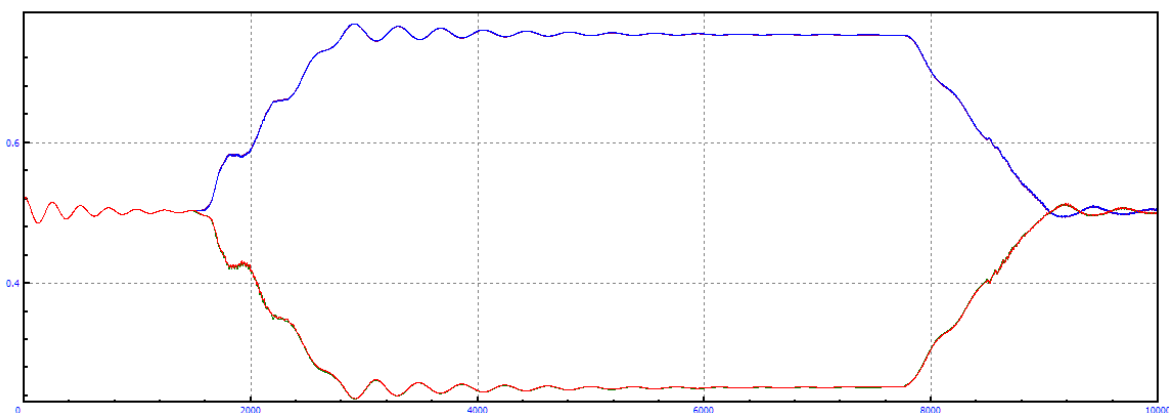


Figura A.436: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=125\text{m/s}$

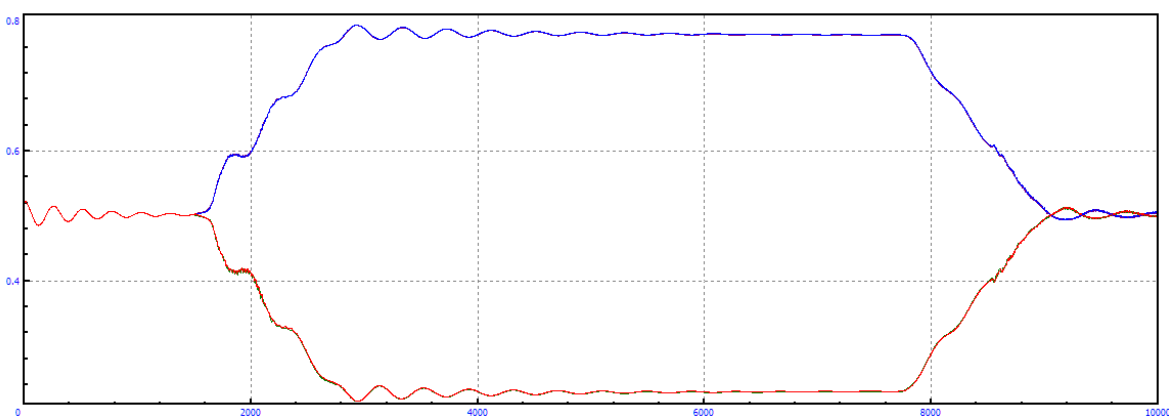


Figura A.437: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=130\text{m/s}$

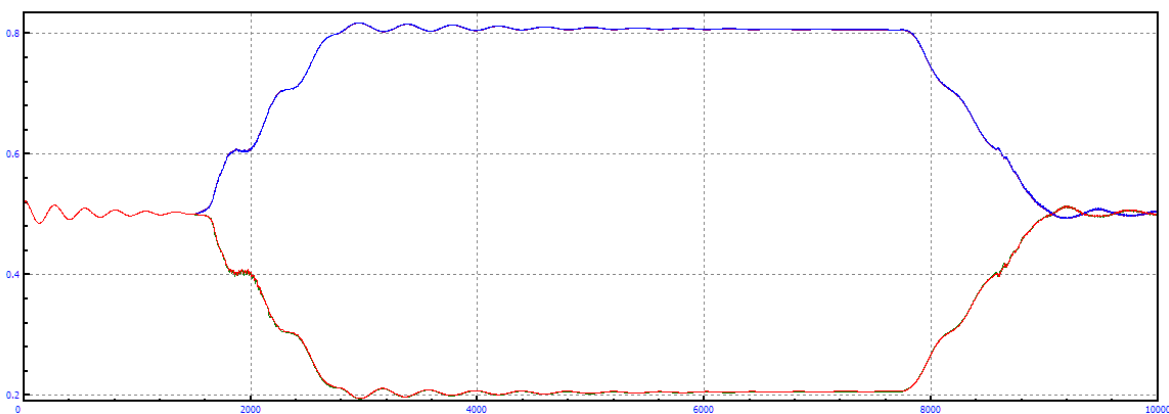


Figura A.438: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-80% y $V=135\text{m/s}$

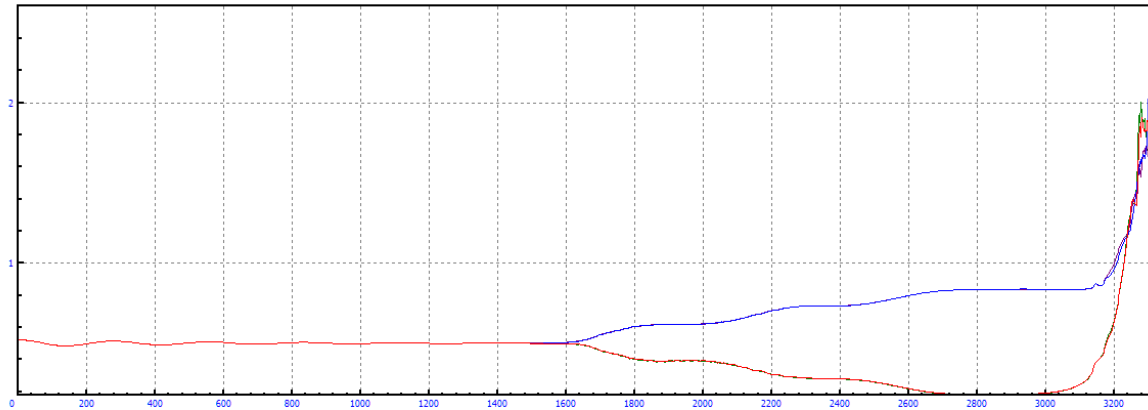


Figura A.439: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=-80\%$ y $V=140\text{m/s}$

B.3.2 MODIFICACIÓN=-60%

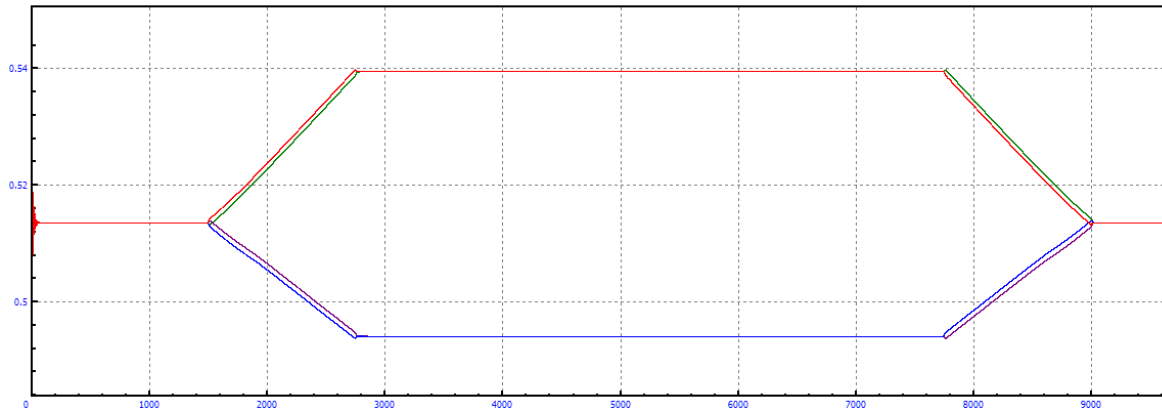


Figura A.440: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-60% y V=5m/s

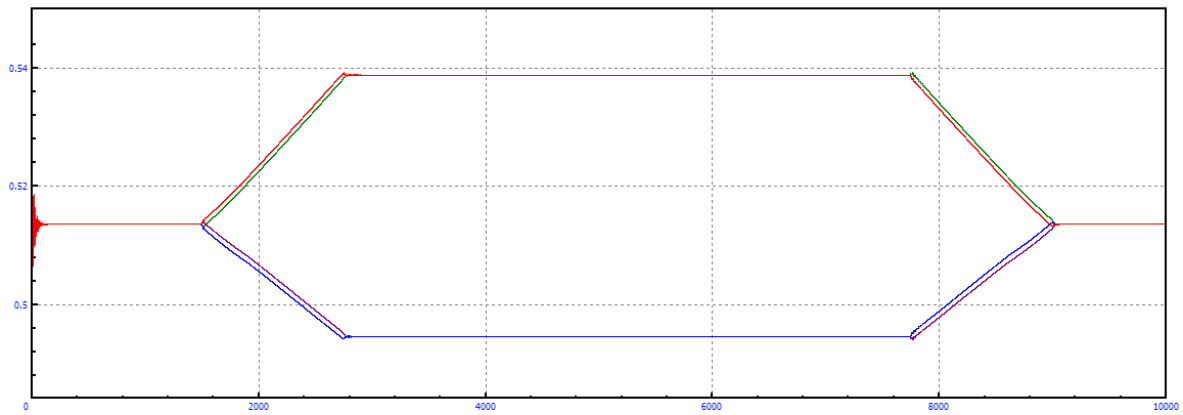


Figura A.441: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-60% y V=10m/s

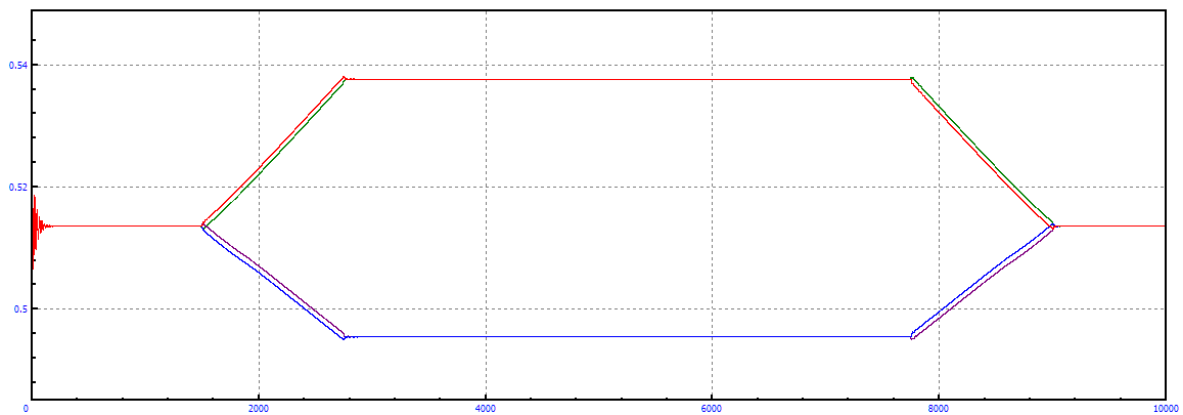


Figura A.442: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-60% y V=15m/s

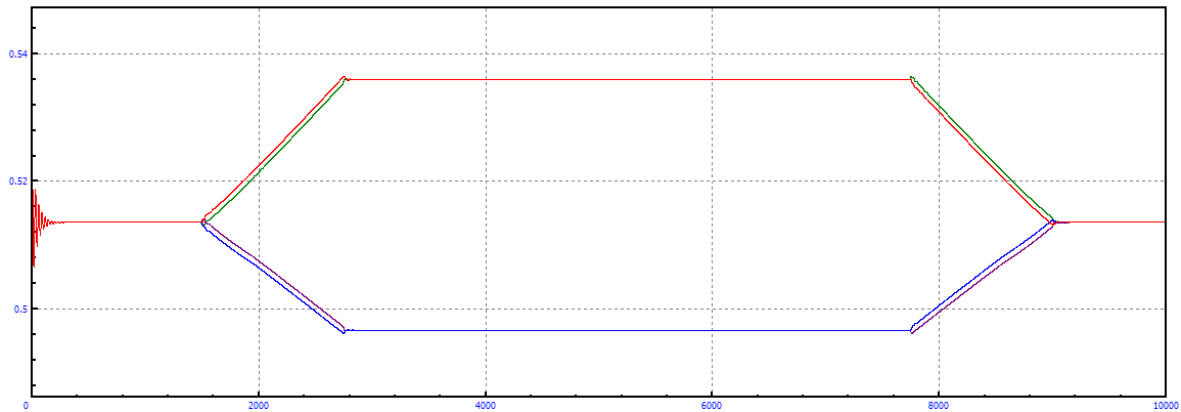


Figura A.443: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=20\text{m/s}$

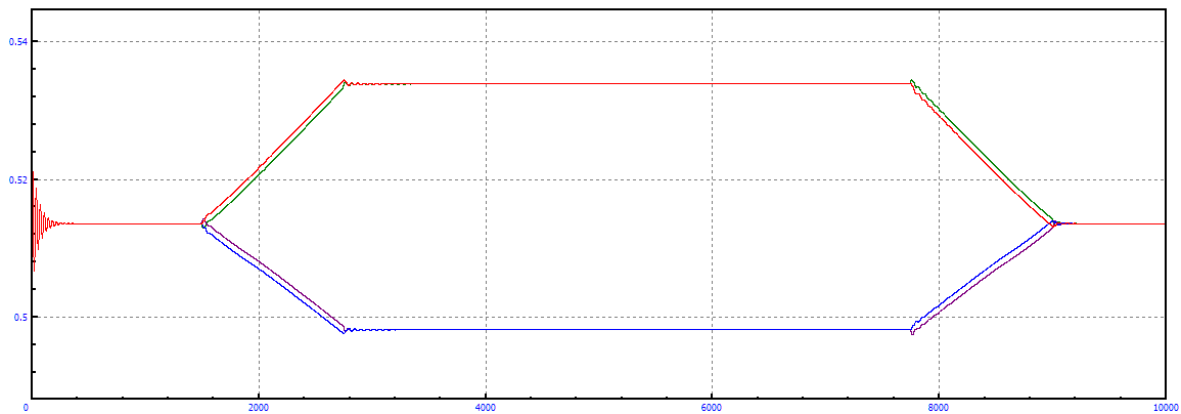


Figura A.444: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=25\text{m/s}$

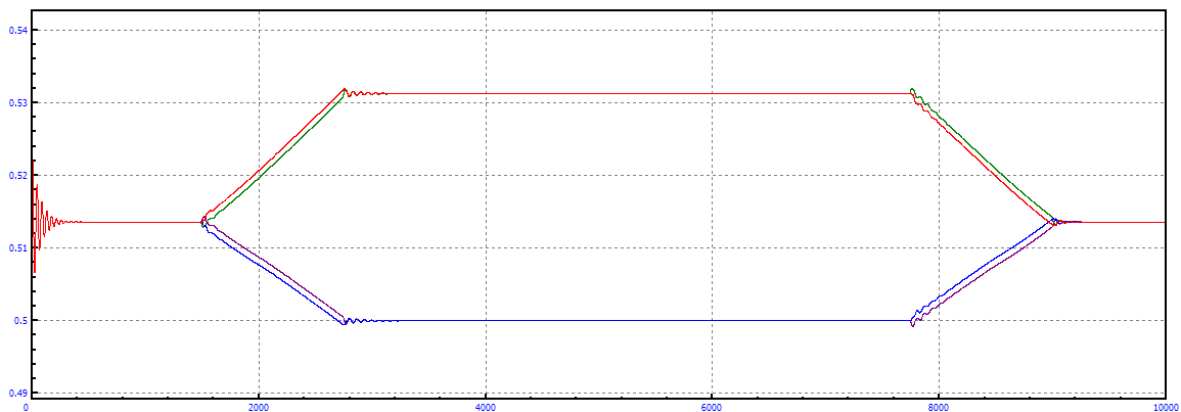


Figura A.445: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=30\text{m/s}$

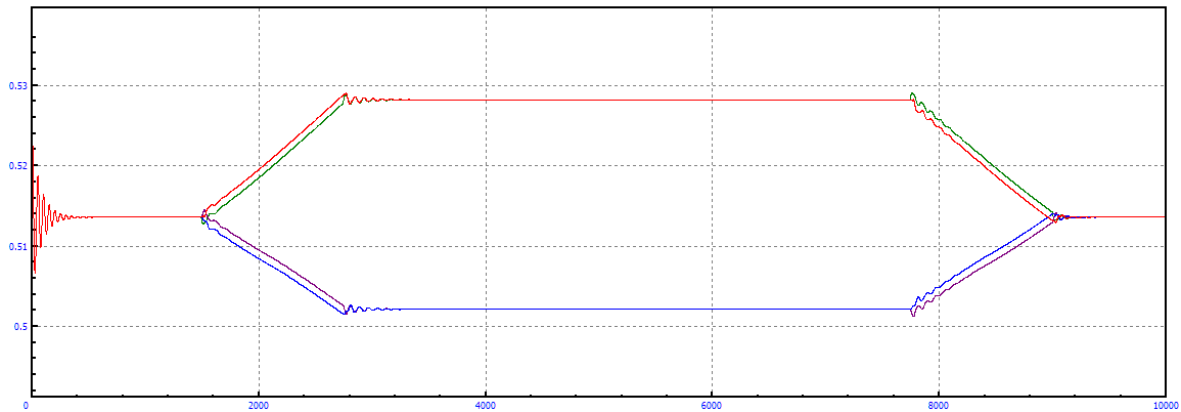


Figura A.446: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-60% y V=35m/s

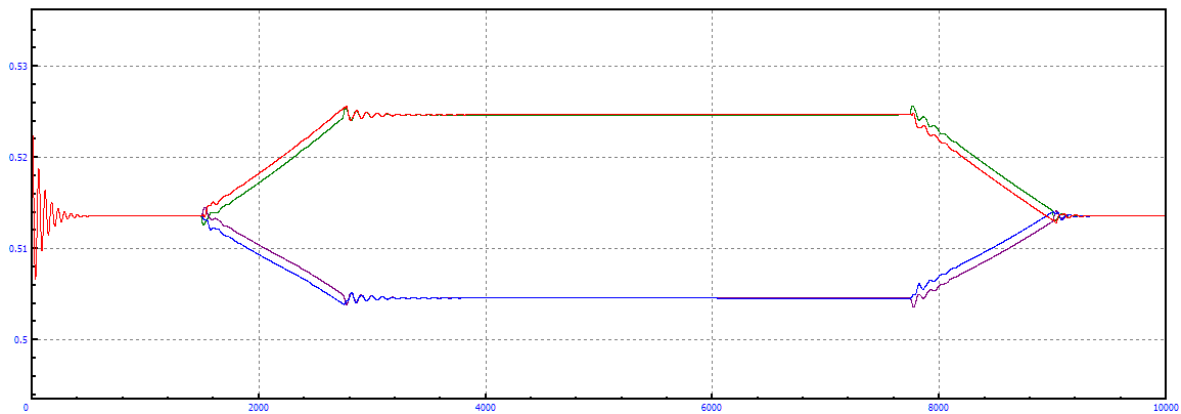


Figura A.447: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-60% y V=40m/s

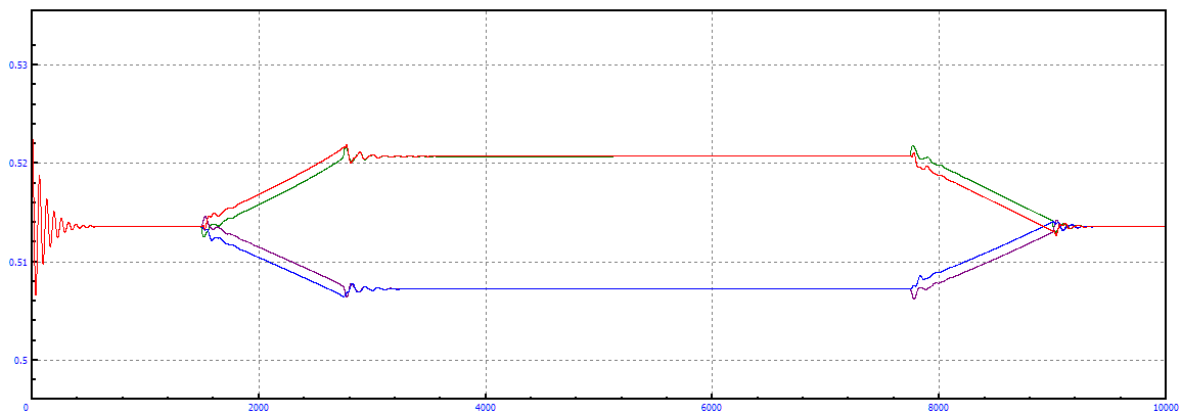


Figura A.448: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-60% y V=45m/s

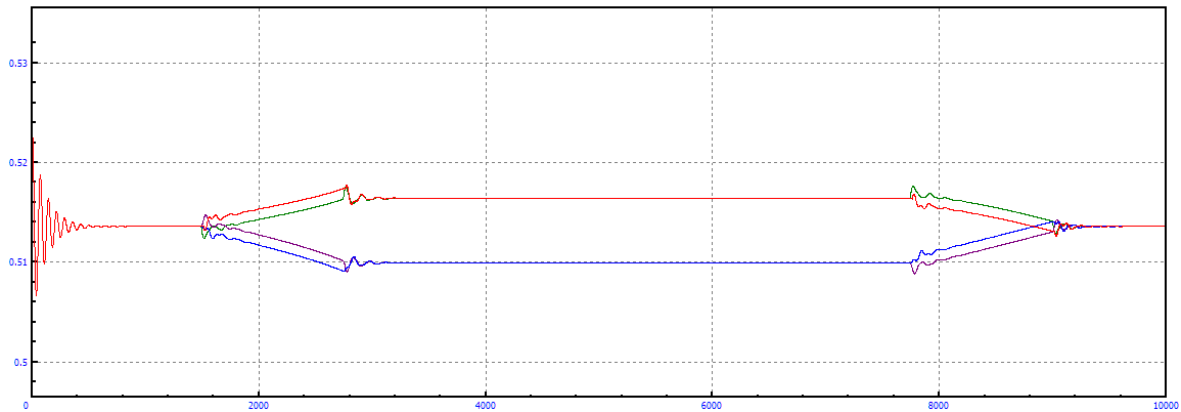


Figura A.449: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=50\text{m/s}$

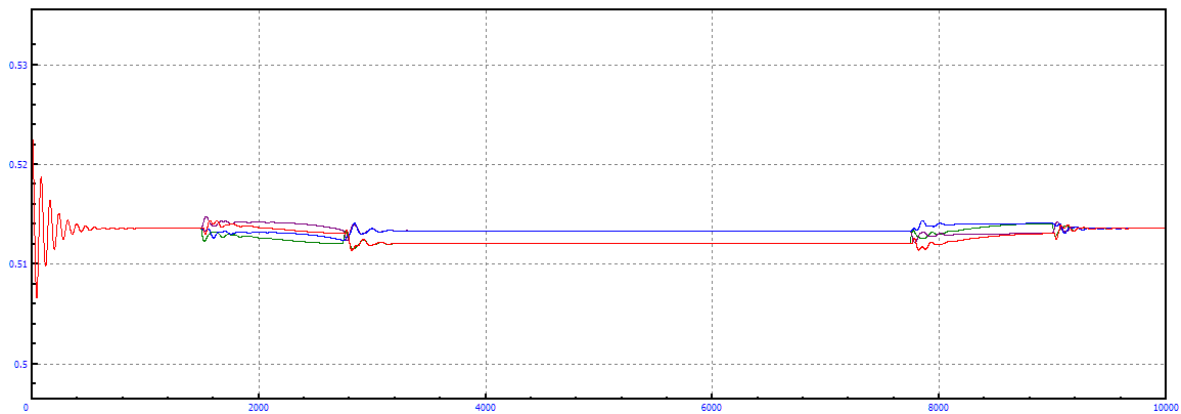


Figura A.450: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=55\text{m/s}$

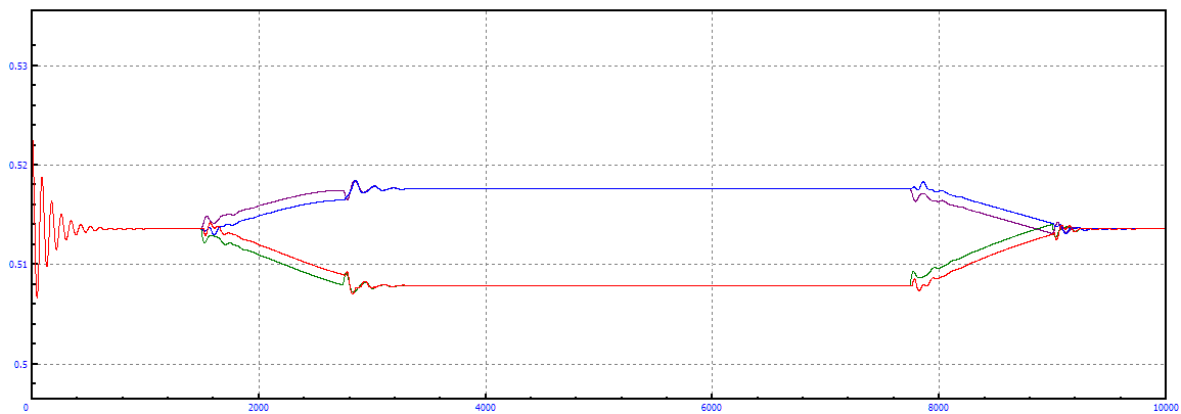


Figura A.451: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=60\text{m/s}$

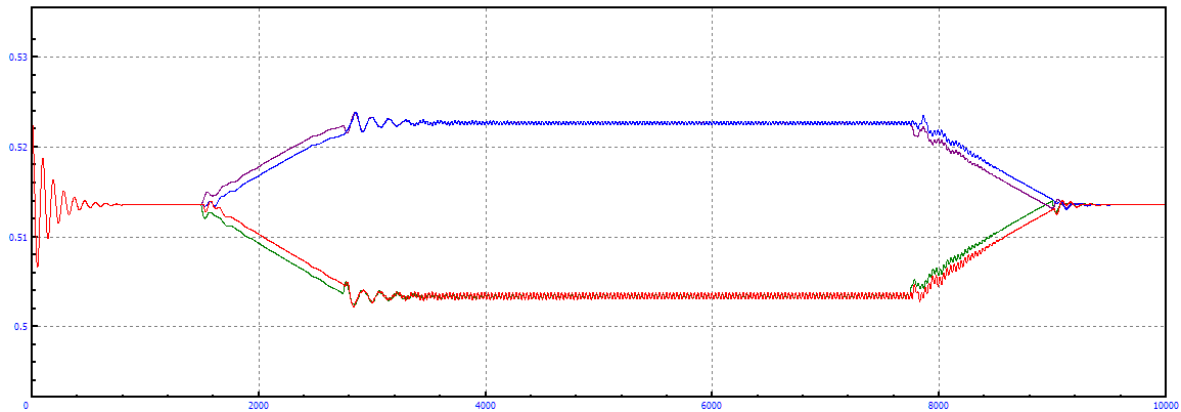


Figura A.452: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=65\text{m/s}$

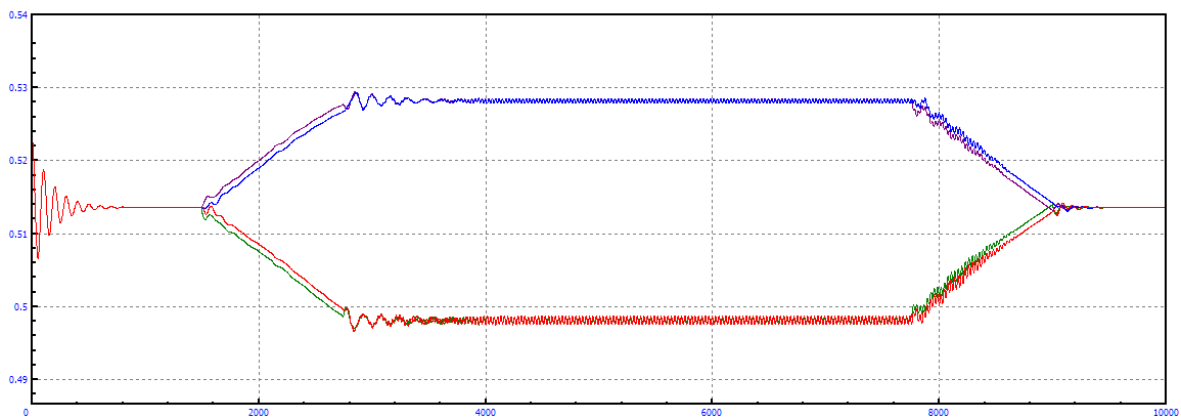


Figura A.453: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=70\text{m/s}$

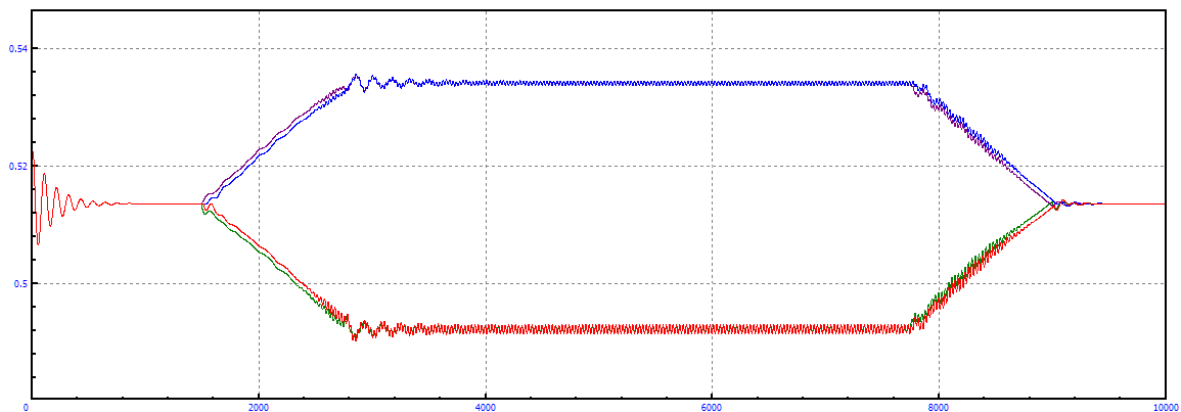


Figura A.454: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=75\text{m/s}$

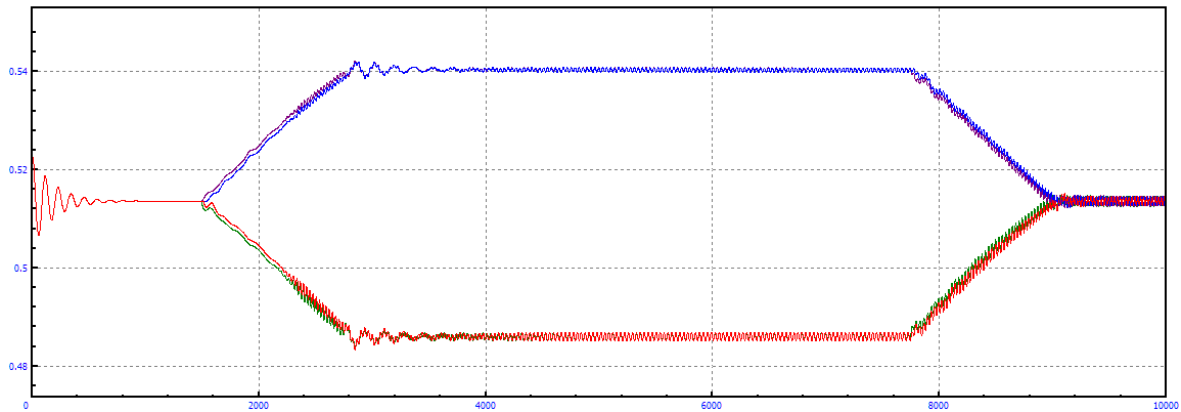


Figura A.455: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=80\text{m/s}$

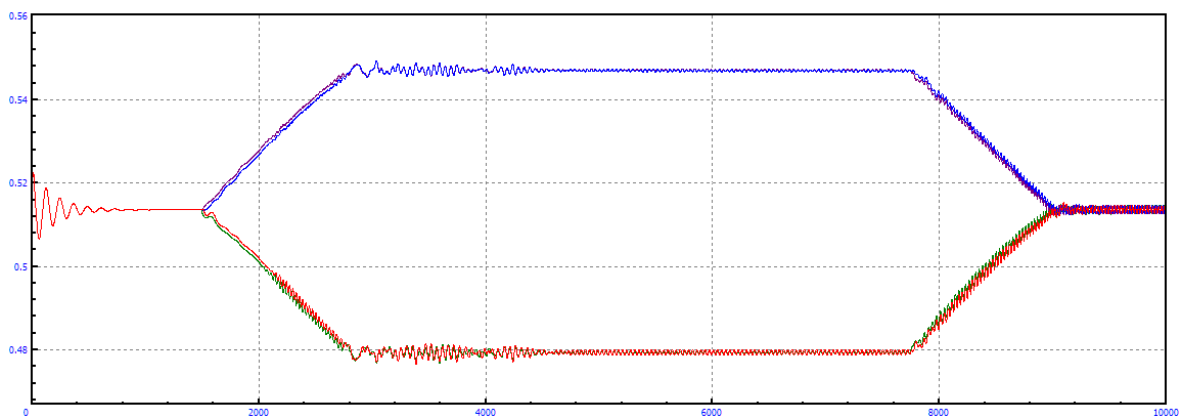


Figura A.456: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=85\text{m/s}$

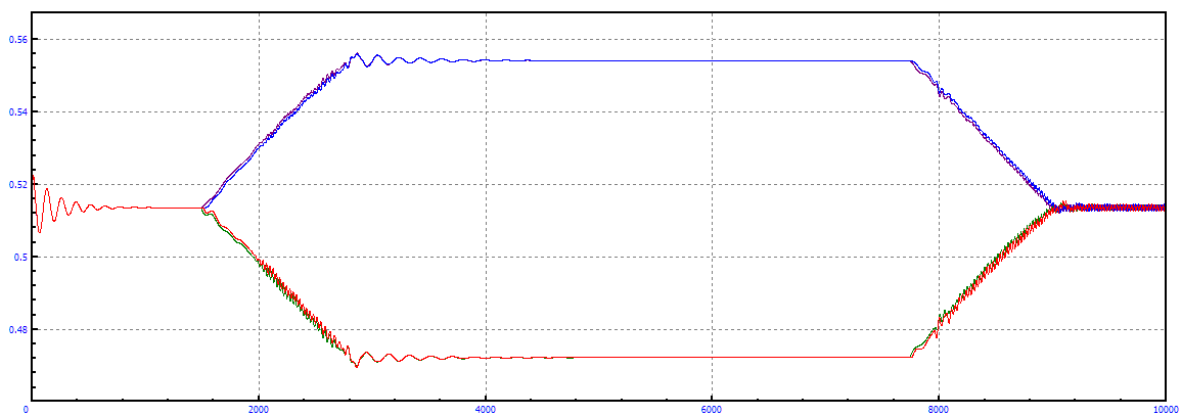


Figura A.457: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=90\text{m/s}$

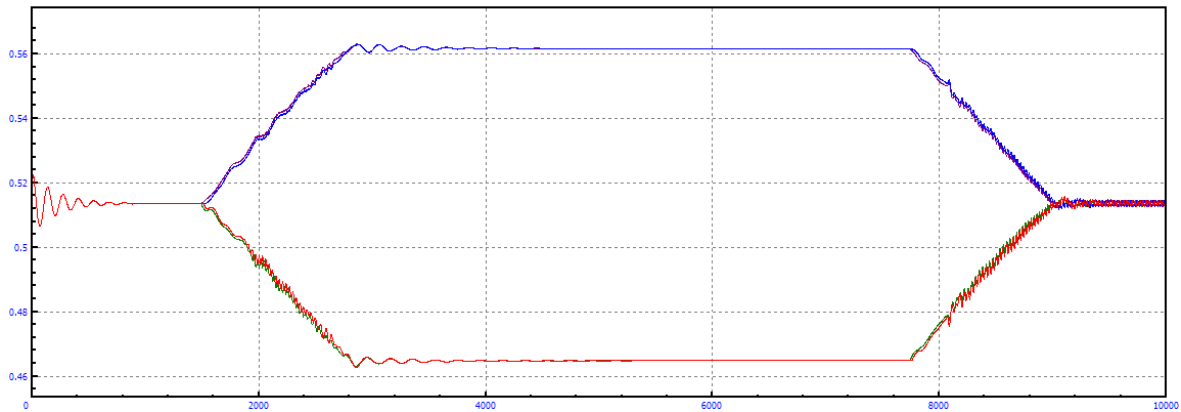


Figura A.458: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=95\text{m/s}$

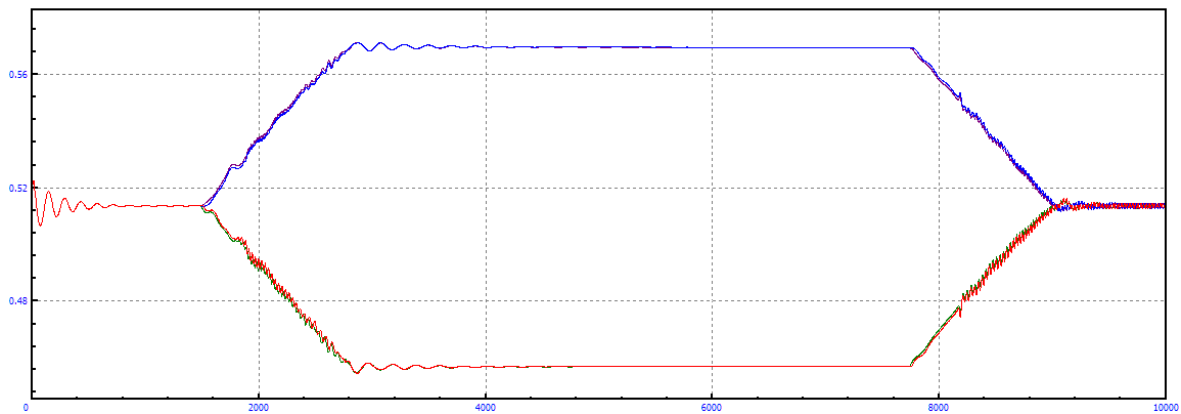


Figura A.459: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=100\text{m/s}$

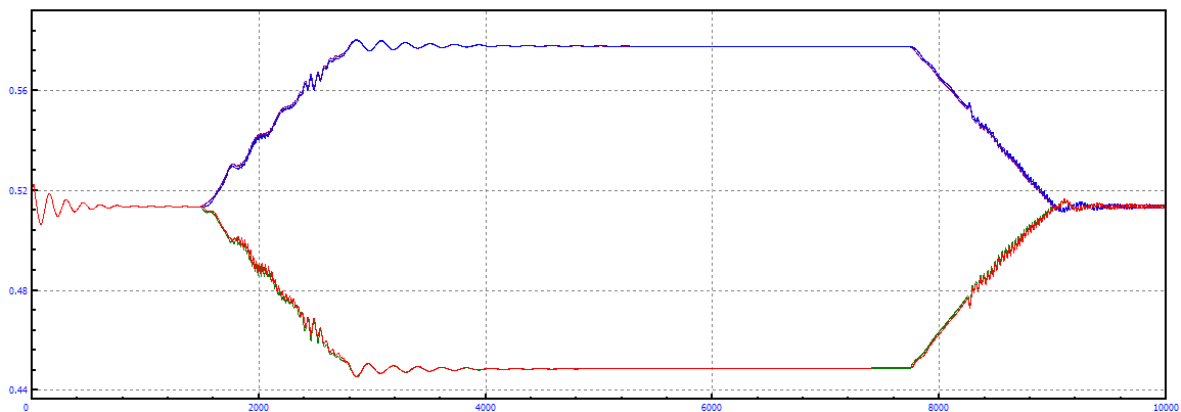


Figura A.460: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=105\text{m/s}$

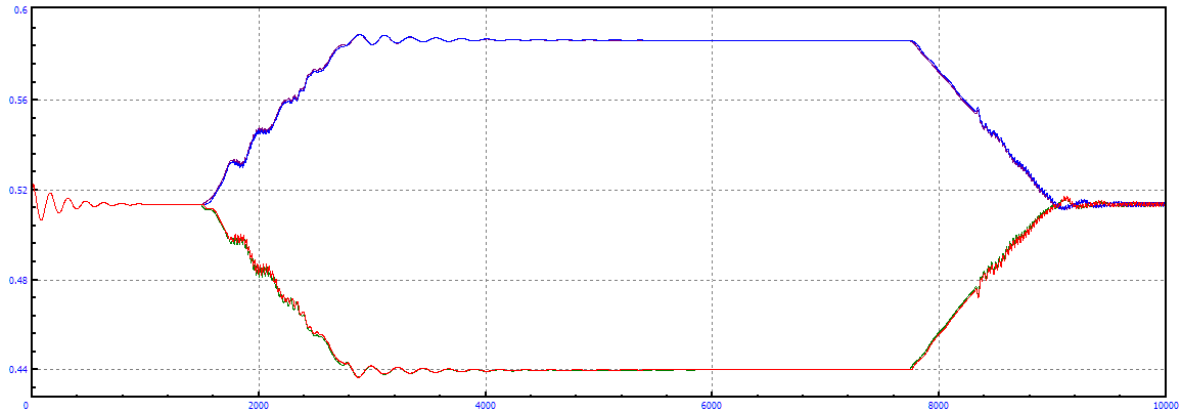


Figura A.461: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=110\text{m/s}$

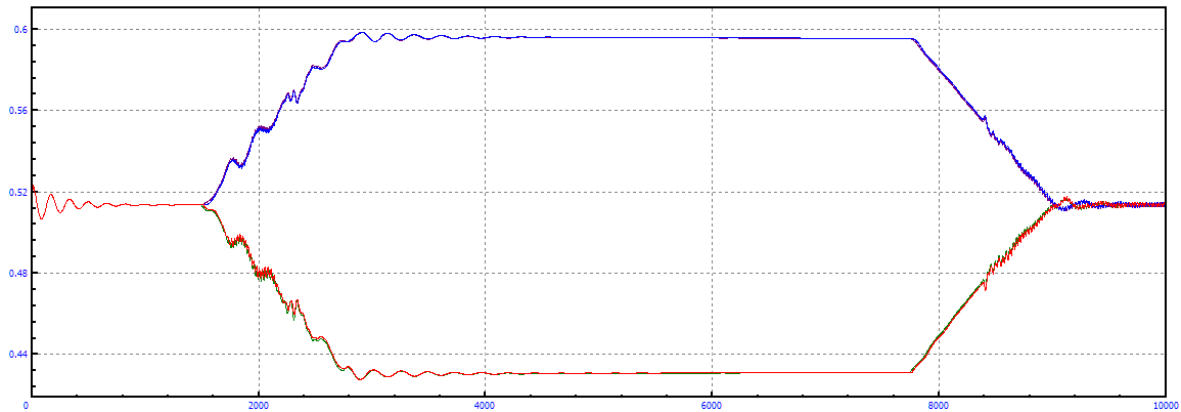


Figura A.462: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=115\text{m/s}$

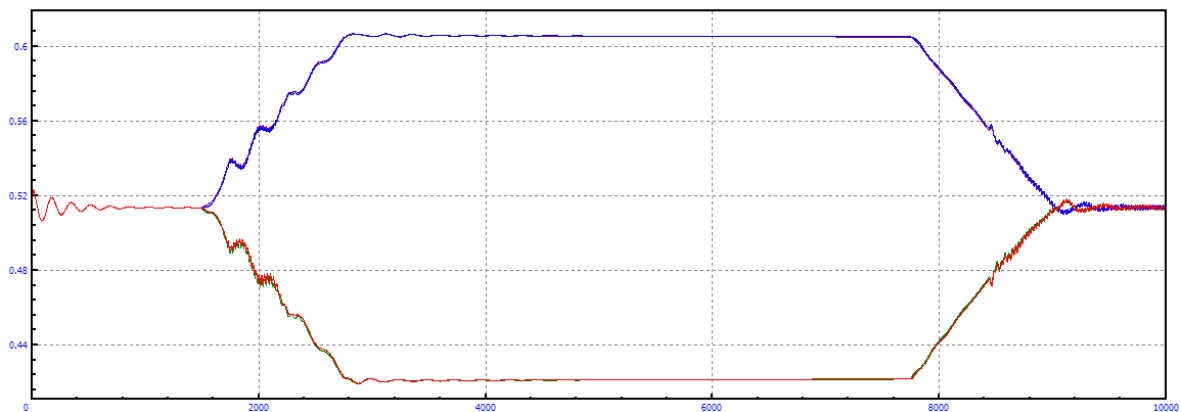


Figura A.463: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=120\text{m/s}$

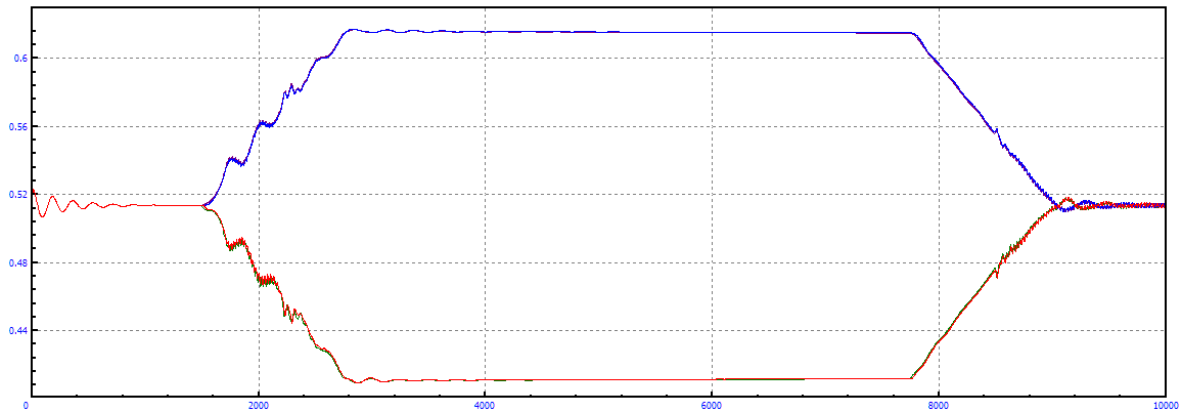


Figura A.464: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=125\text{m/s}$

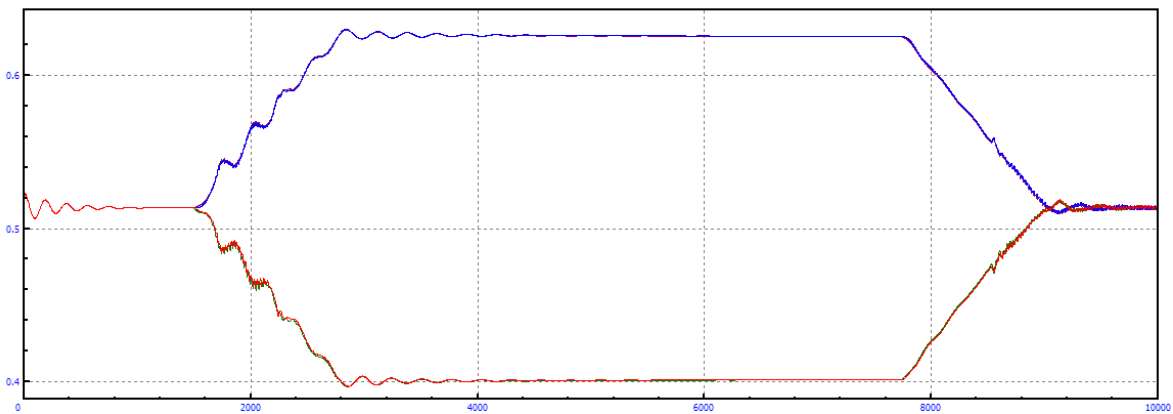


Figura A.465: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=130\text{m/s}$

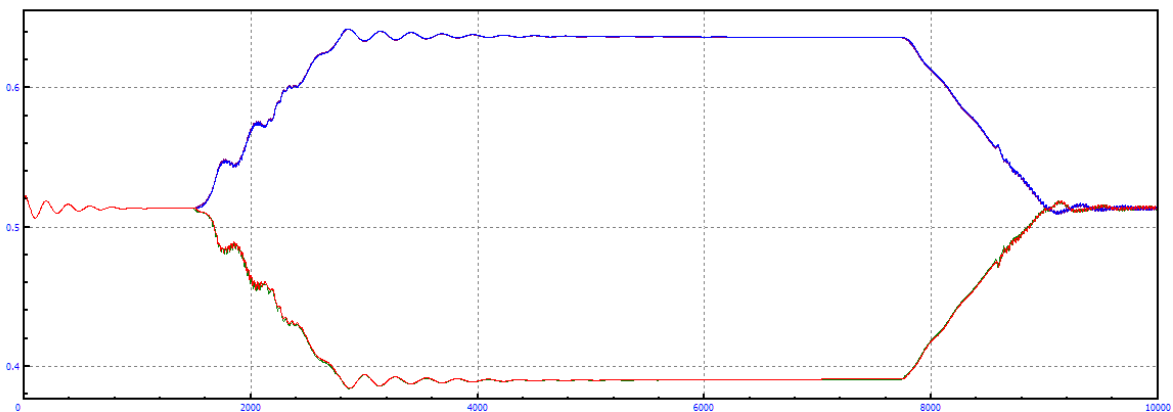


Figura A.466: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=135\text{m/s}$

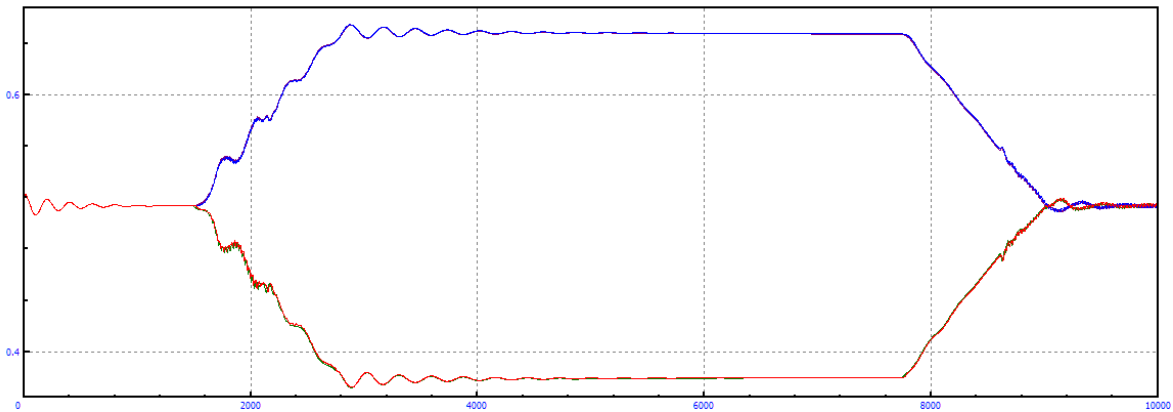


Figura A.467: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=140\text{m/s}$

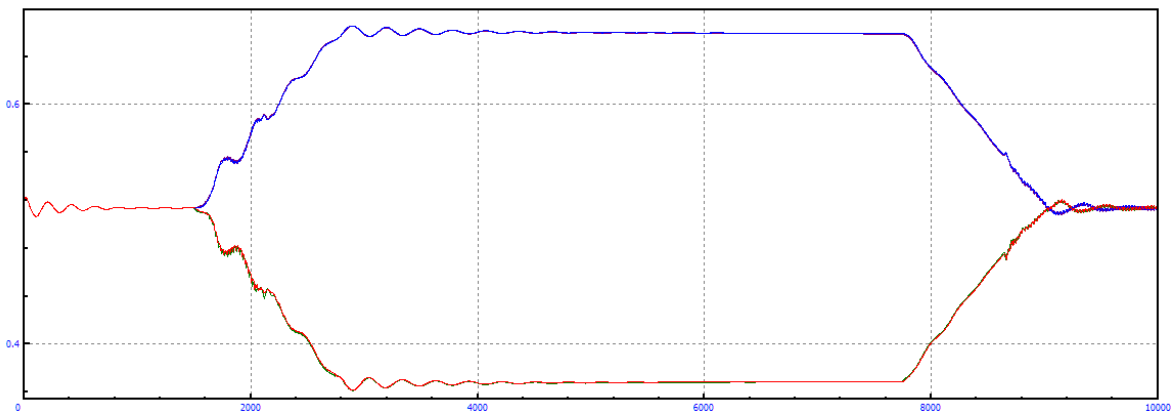


Figura A.468: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=145\text{m/s}$

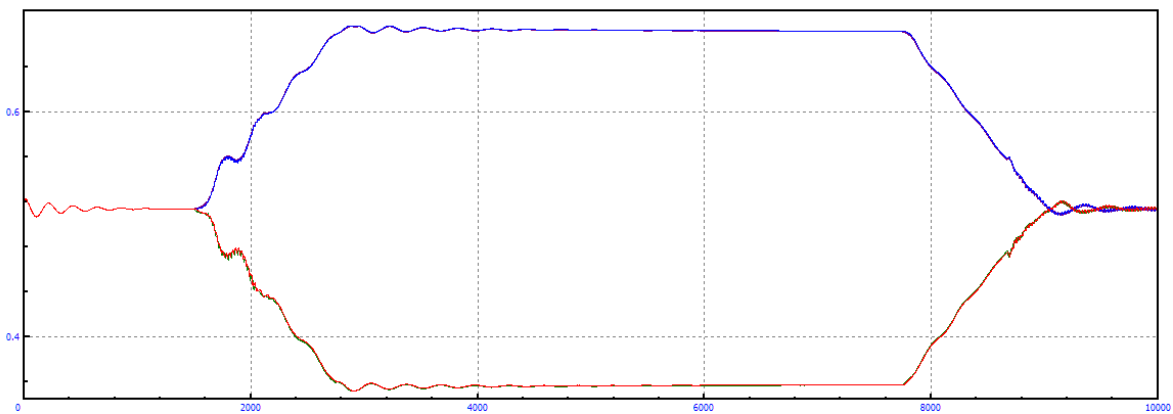


Figura A.469: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-60% y $V=150\text{m/s}$

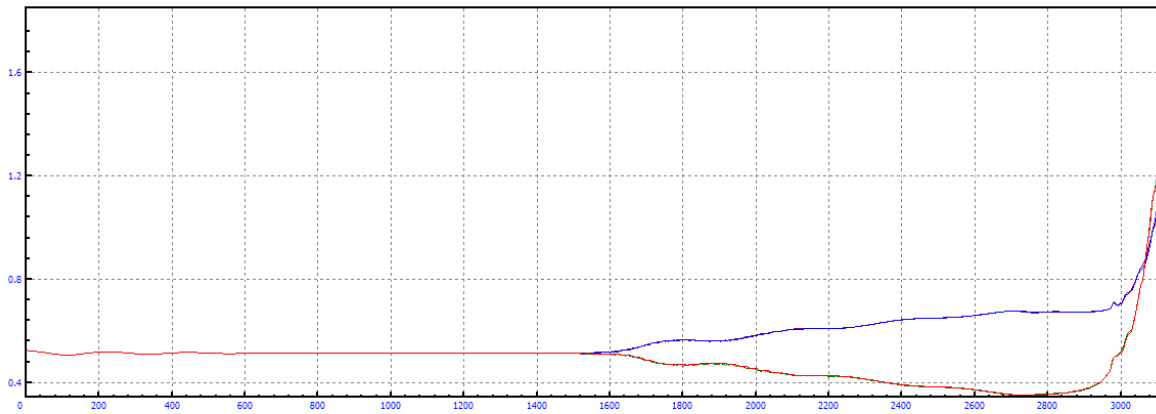


Figura A.470: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=-60\%$ y $V=155\text{m/s}$

B.3.3 MODIFICACIÓN=-40%

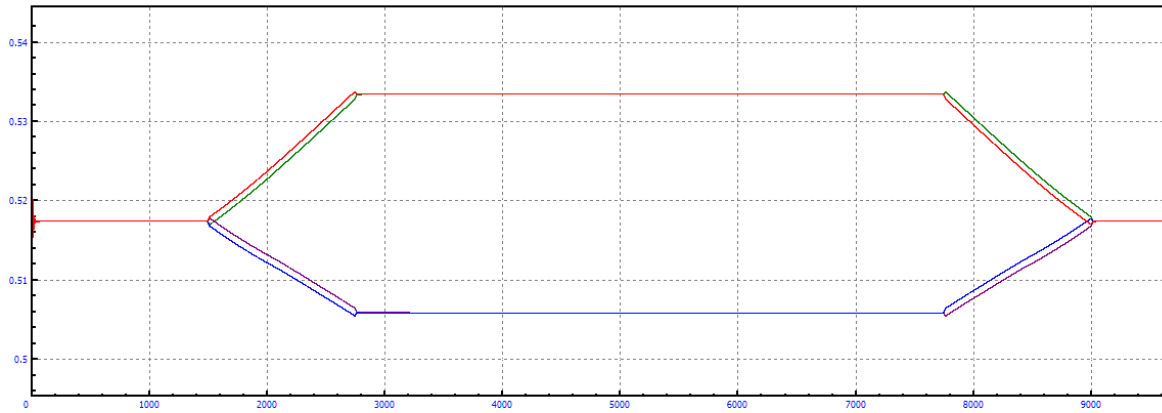


Figura A.471: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=5\text{m/s}$

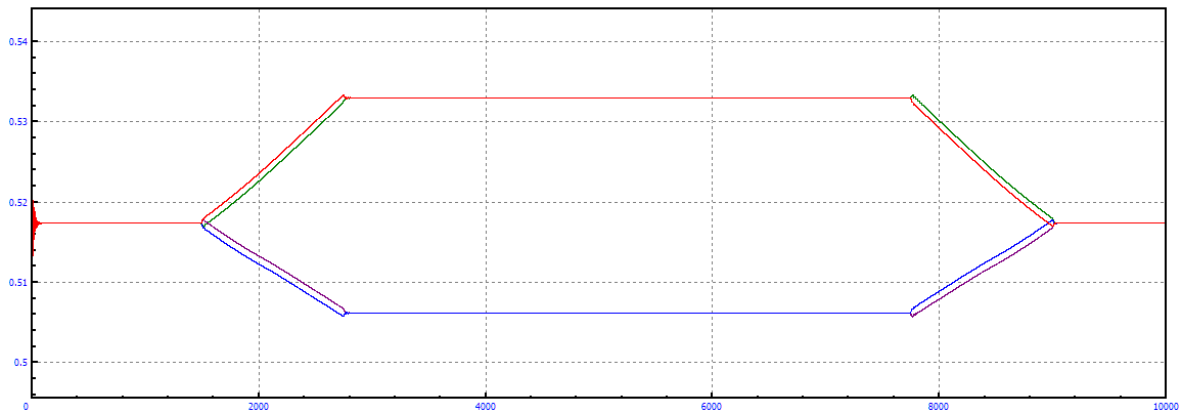


Figura A.472: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=10\text{m/s}$

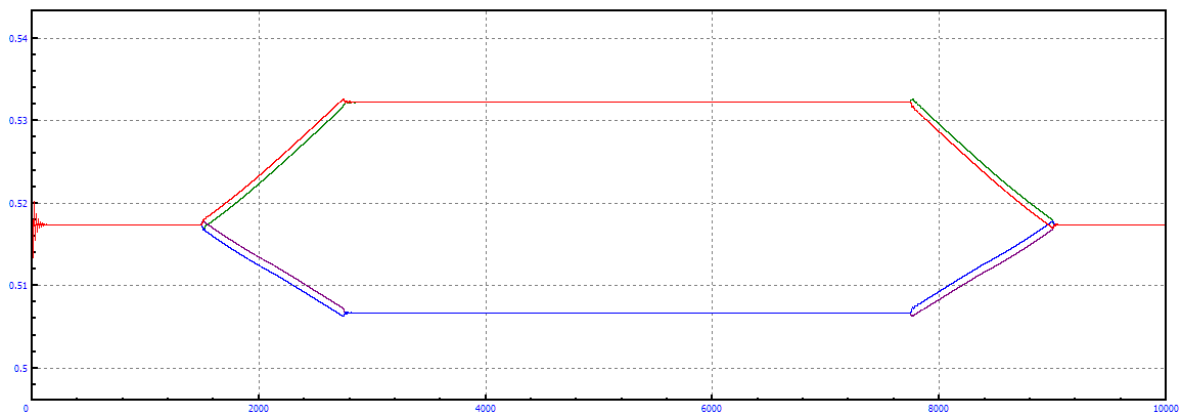


Figura A.473: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=15\text{m/s}$

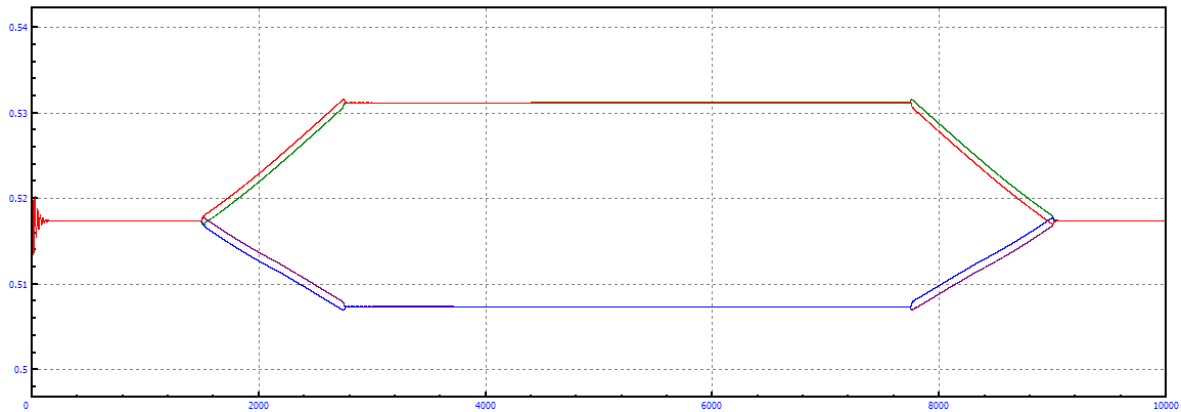


Figura A.474: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=20\text{m/s}$

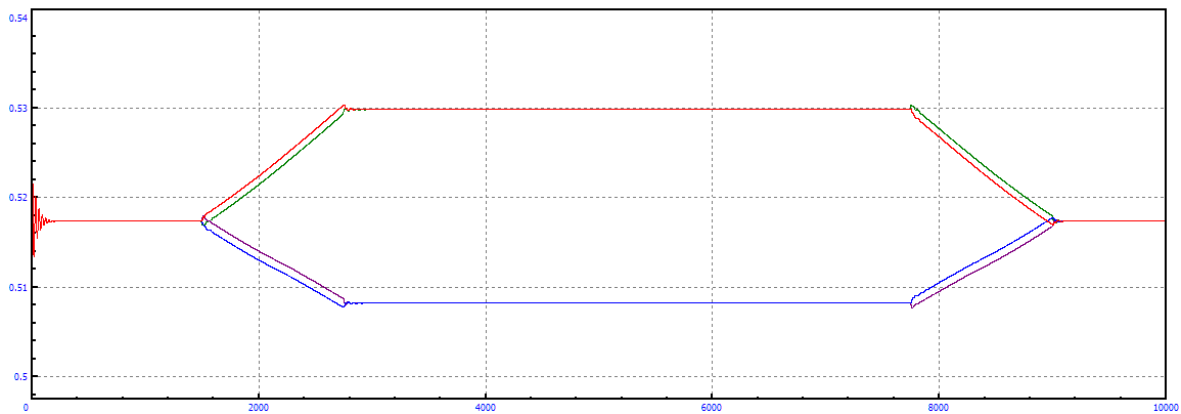


Figura A.475: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=25\text{m/s}$

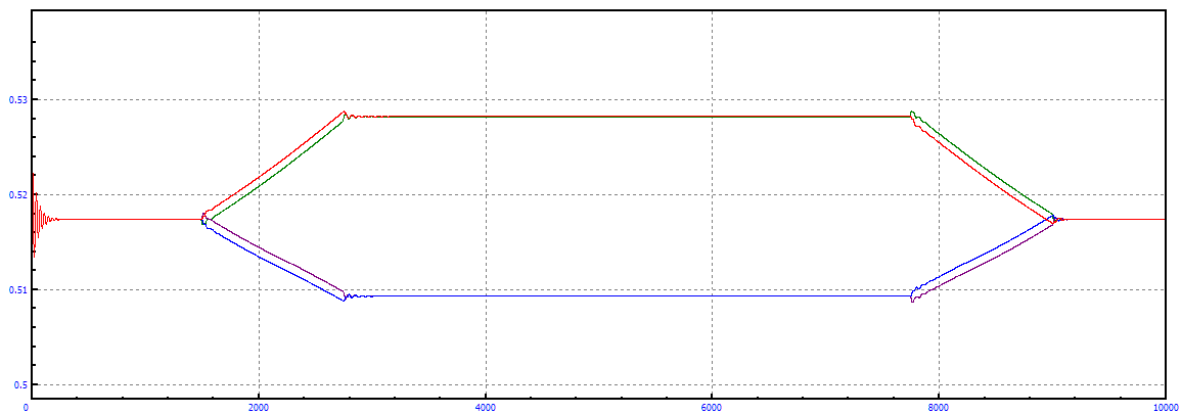


Figura A.476: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=30\text{m/s}$

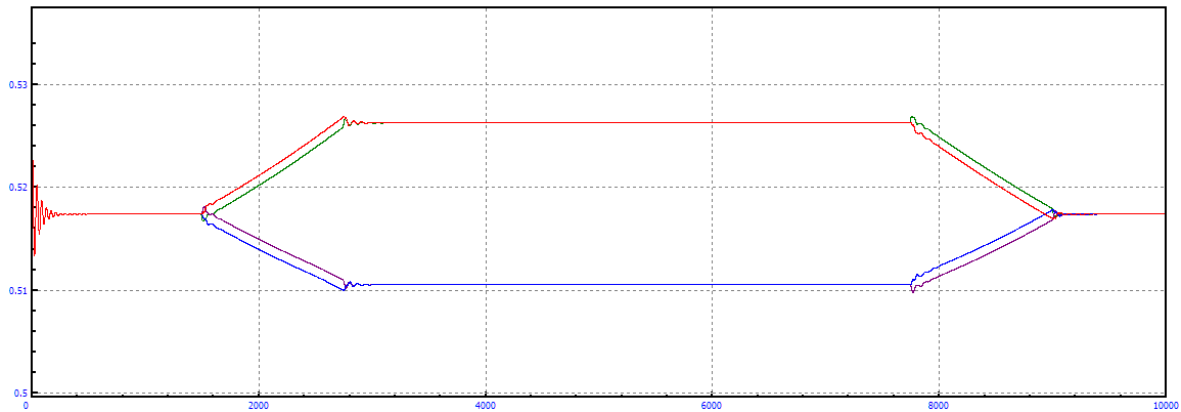


Figura A.477: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=35\text{m/s}$

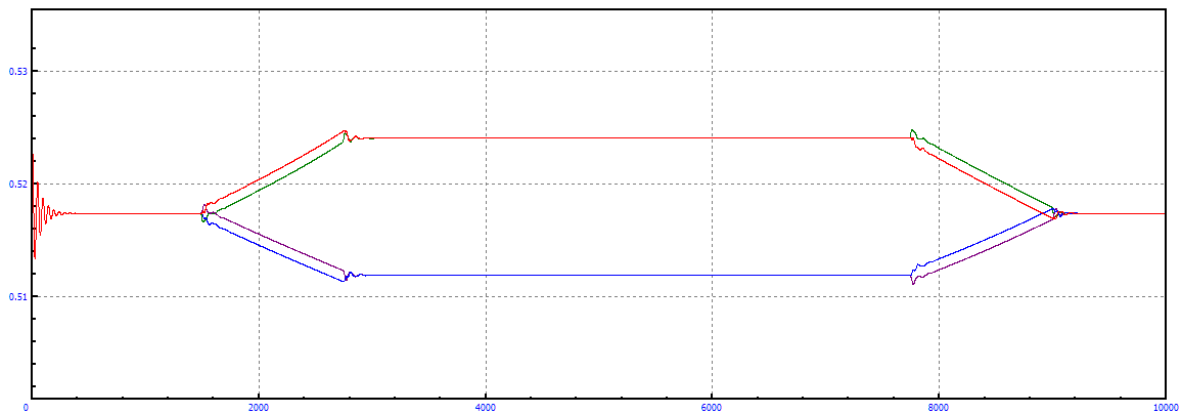


Figura A.478: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=40\text{m/s}$

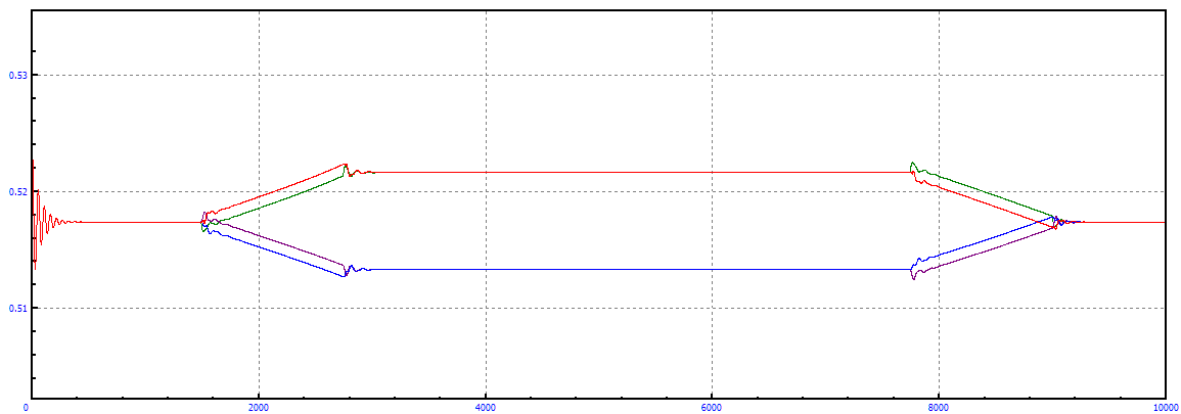


Figura A.479: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=45\text{m/s}$

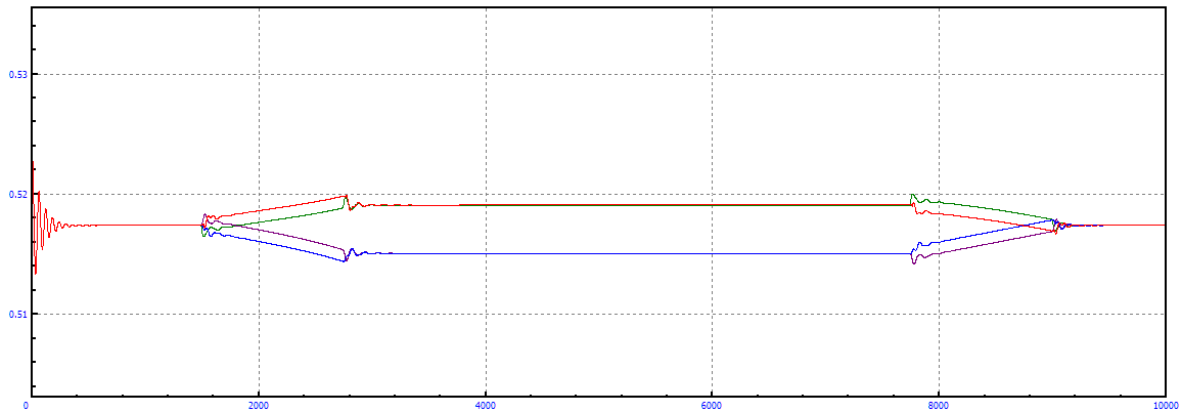


Figura A.480: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=50\text{m/s}$

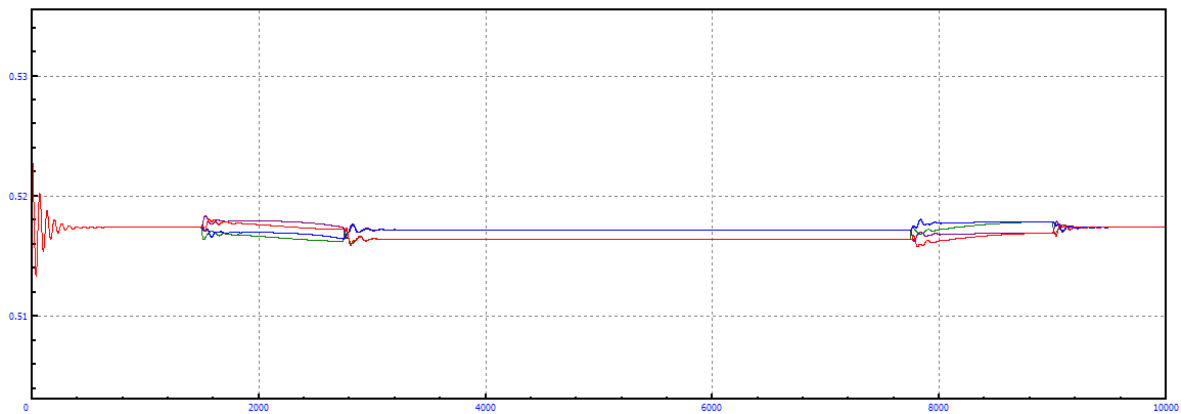


Figura A.481: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=55\text{m/s}$

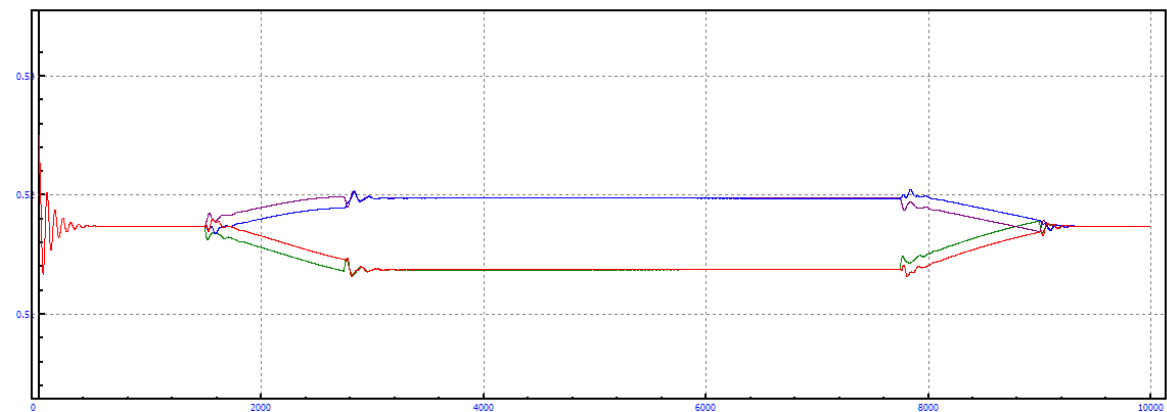


Figura A.482: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=60\text{m/s}$

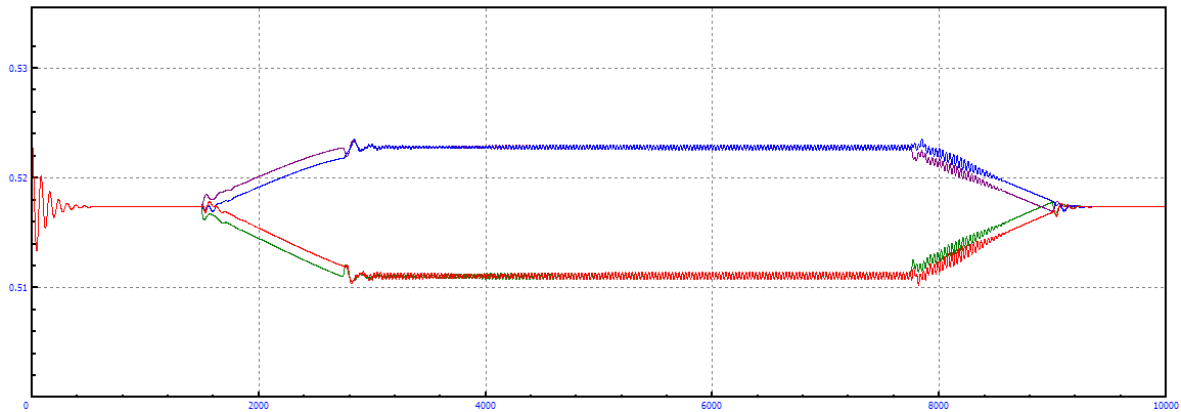


Figura A.483: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=65\text{m/s}$

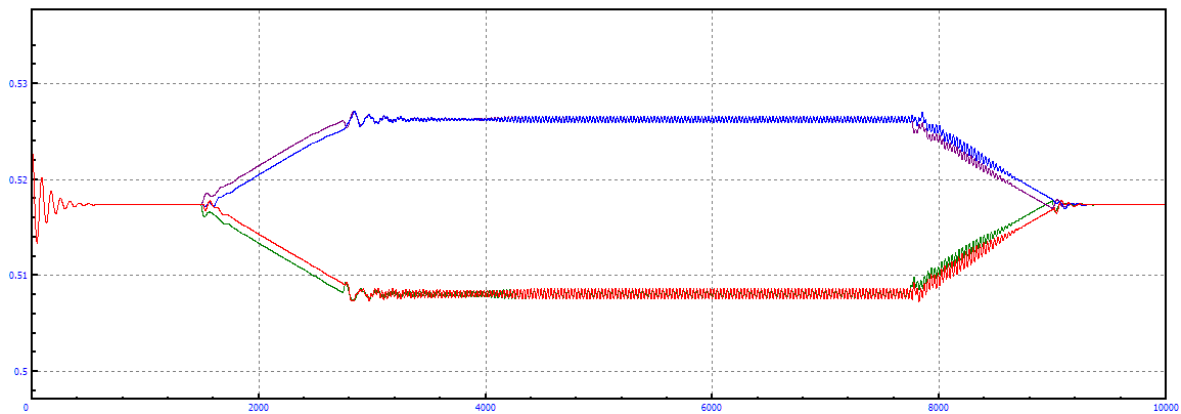


Figura A.484: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=70\text{m/s}$

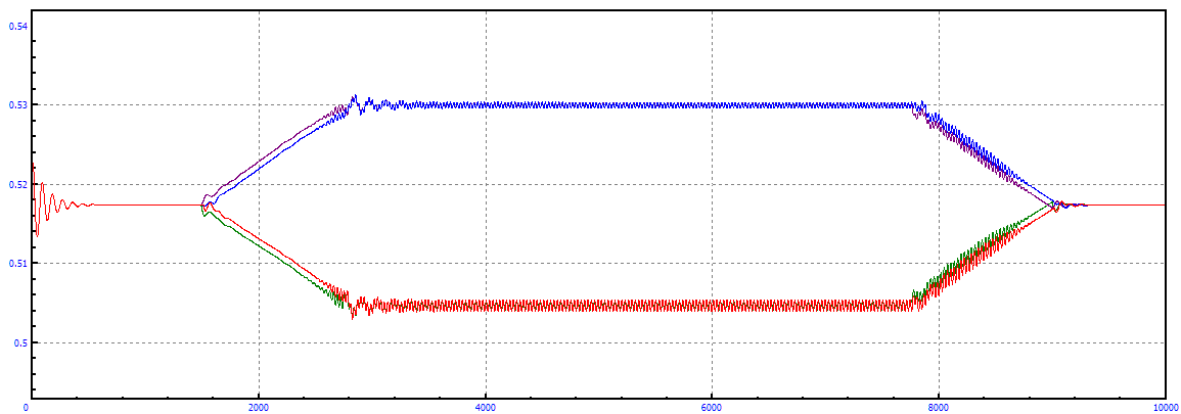


Figura A.485: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=75\text{m/s}$

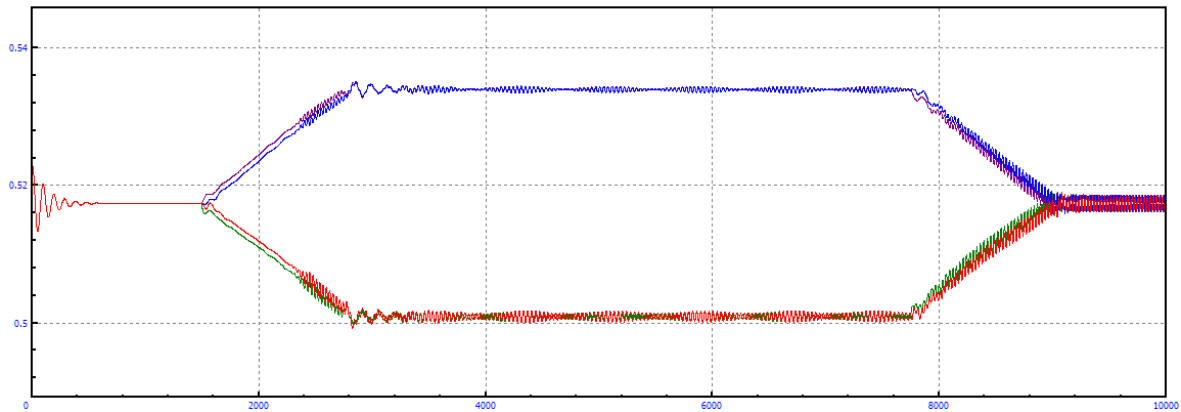


Figura A.486: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=80\text{m/s}$

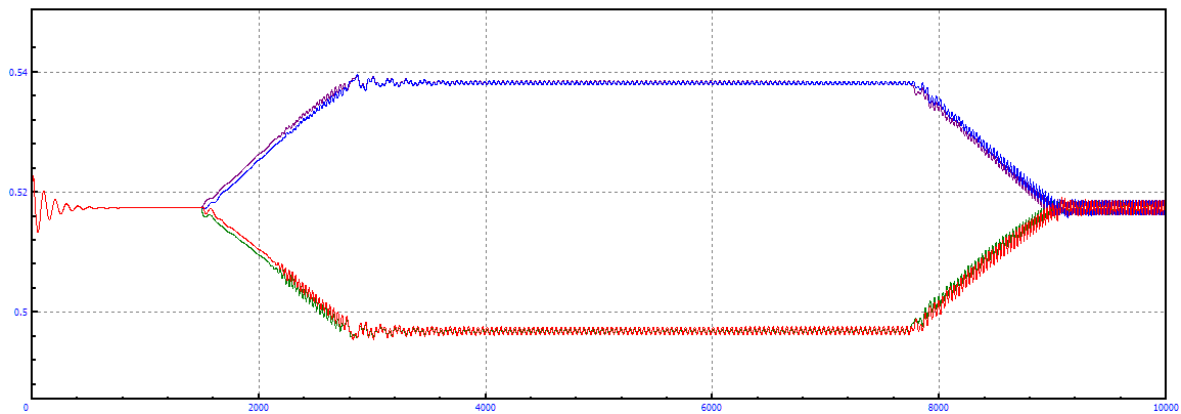


Figura A.487: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=85\text{m/s}$

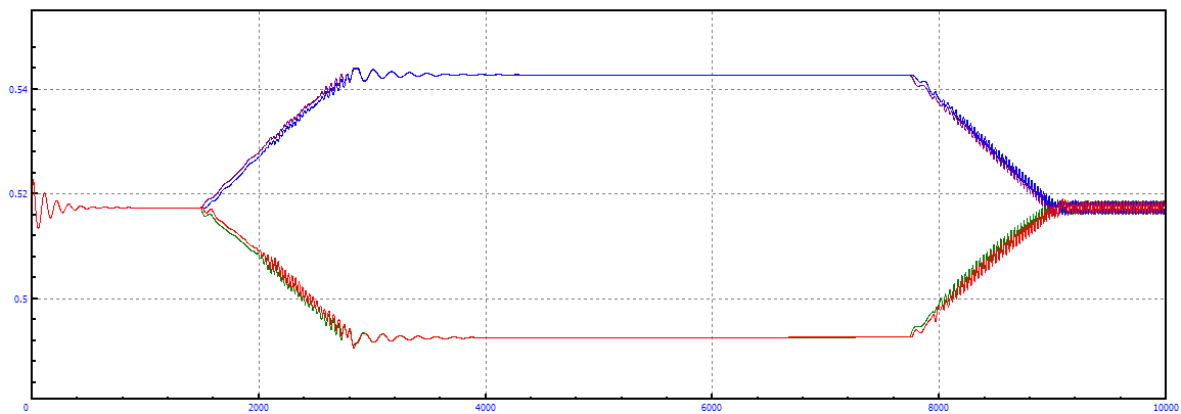


Figura A.488: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=90\text{m/s}$

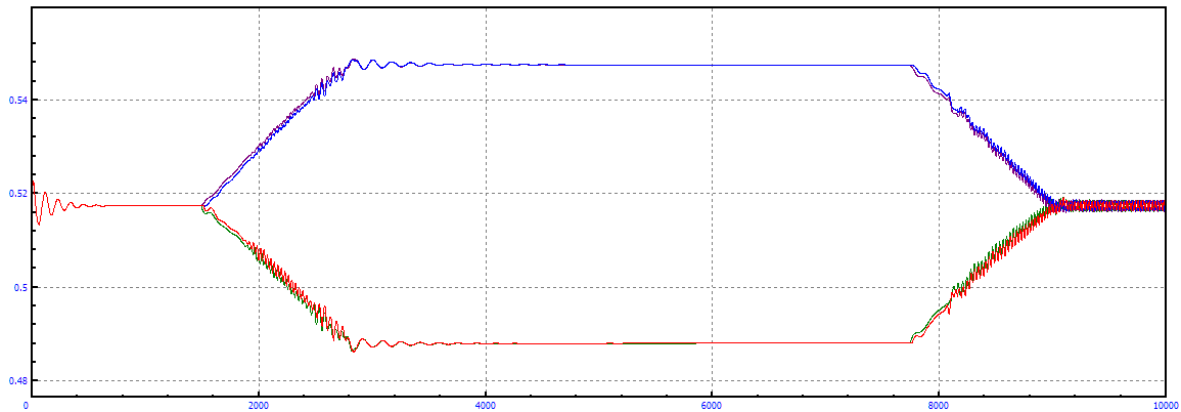


Figura A.489: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=95\text{m/s}$

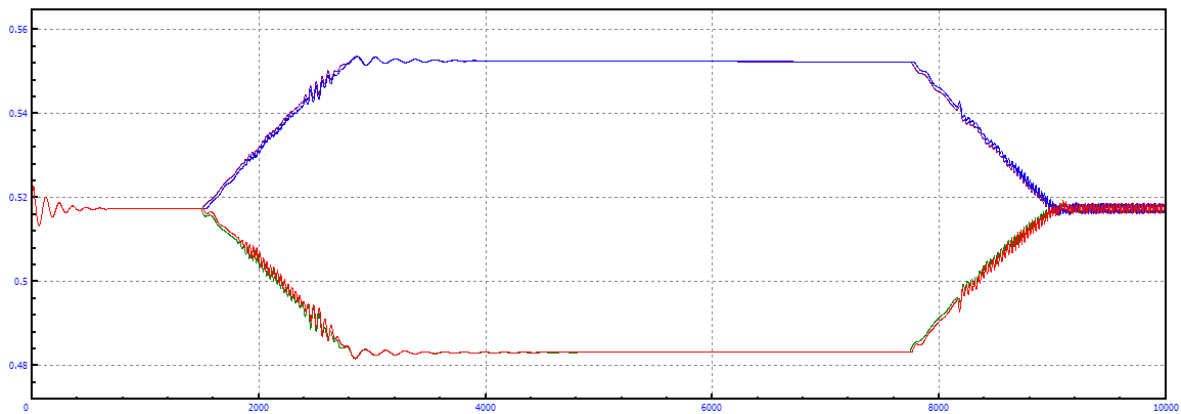


Figura A.490: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=100\text{m/s}$

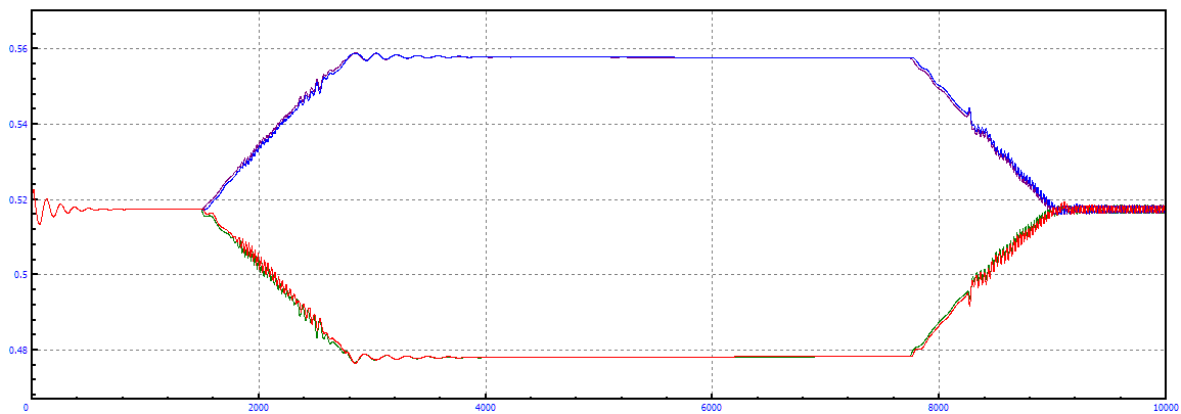


Figura A.491: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=105\text{m/s}$

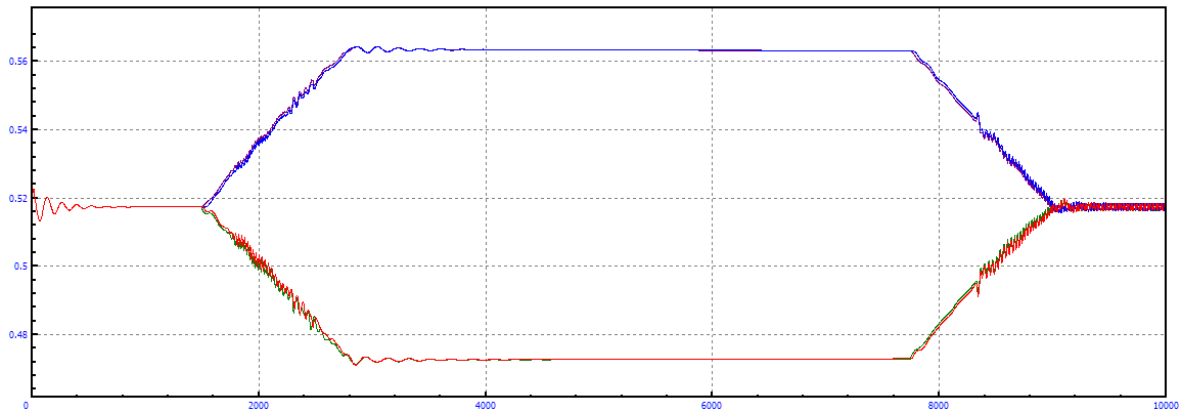


Figura A.492: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=110\text{m/s}$

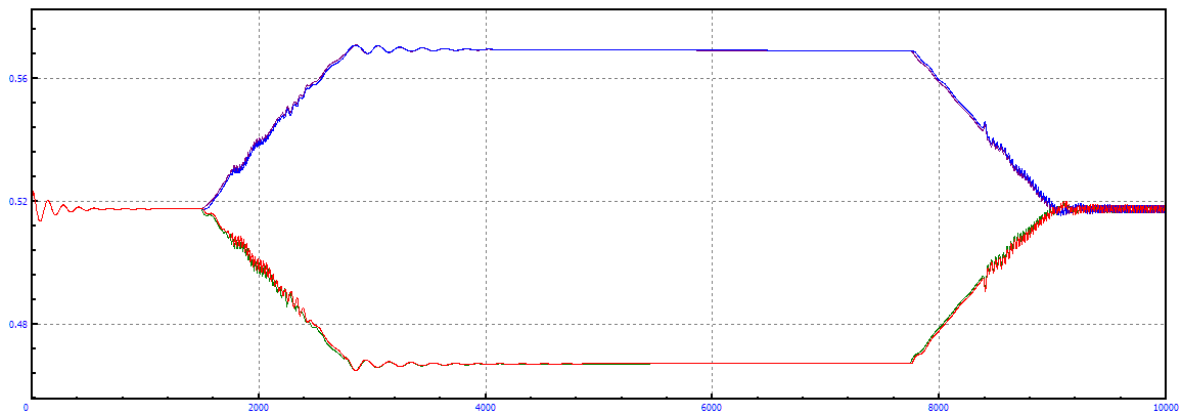


Figura A.493: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=115\text{m/s}$

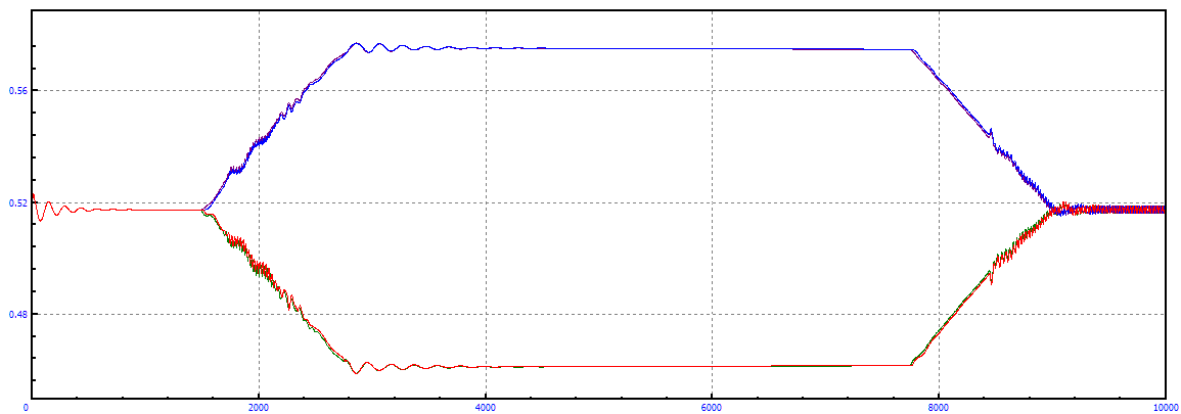


Figura A.494: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=120\text{m/s}$

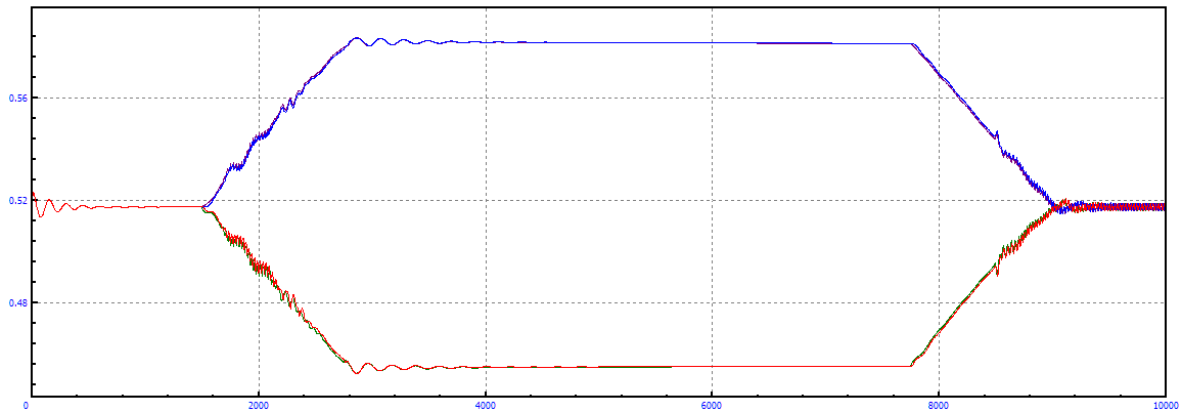


Figura A.495: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=125\text{m/s}$

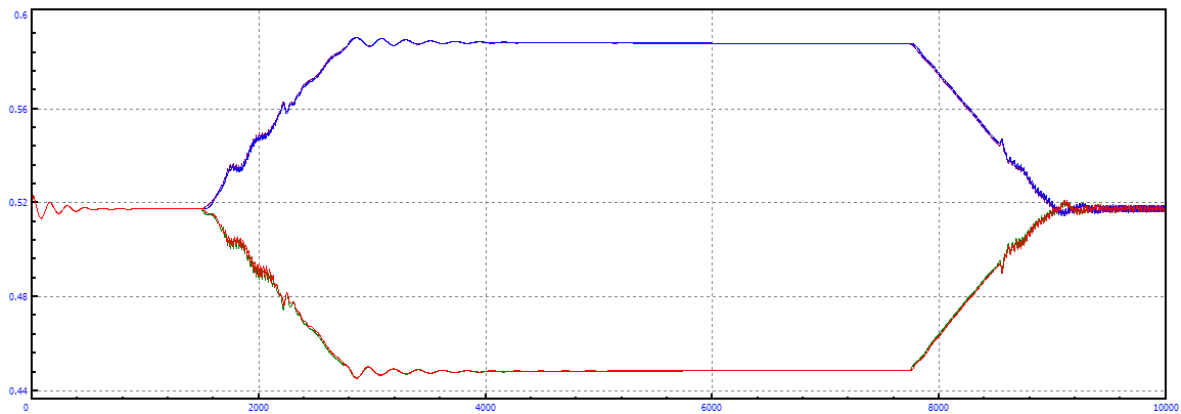


Figura A.496: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=130\text{m/s}$

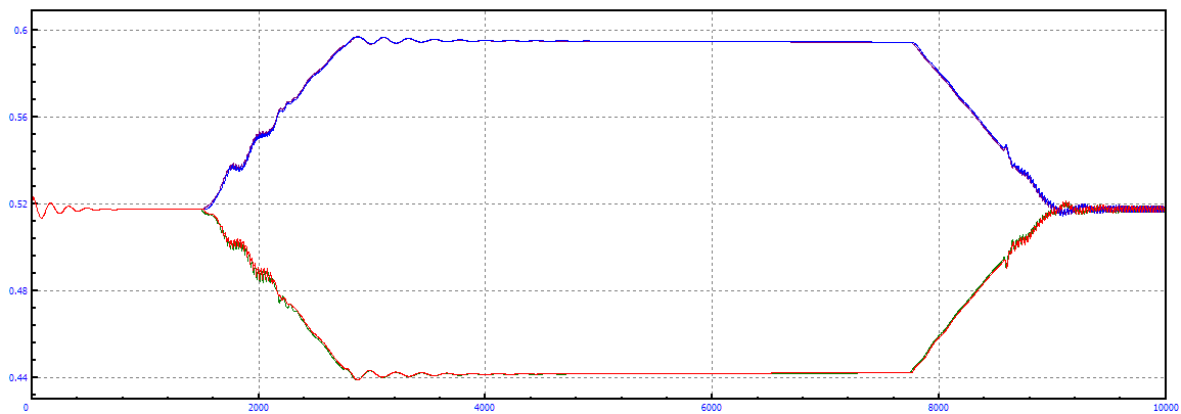


Figura A.497: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=135\text{m/s}$

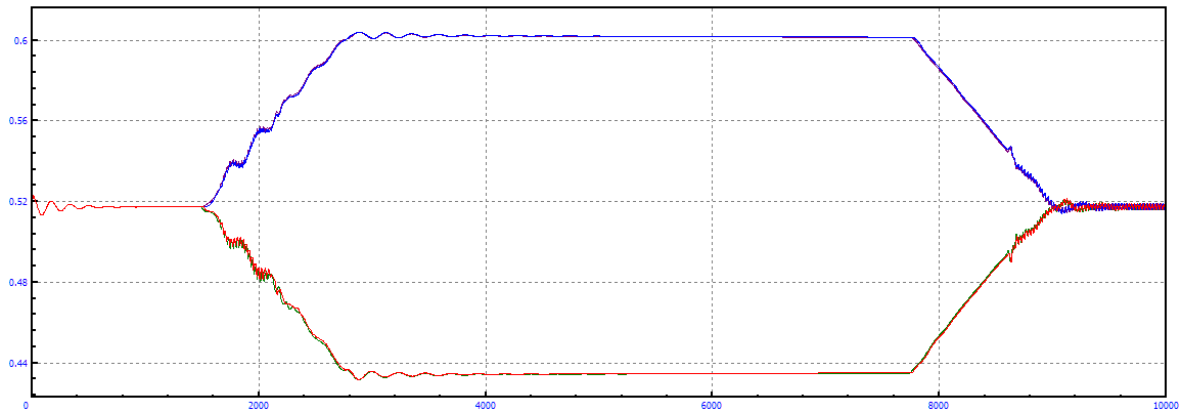


Figura A.498: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=140\text{m/s}$

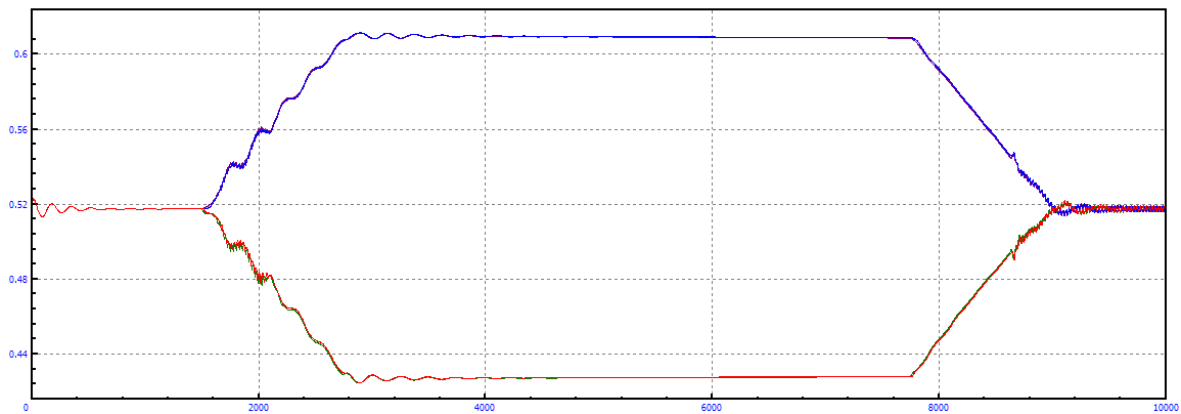


Figura A.499: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=145\text{m/s}$

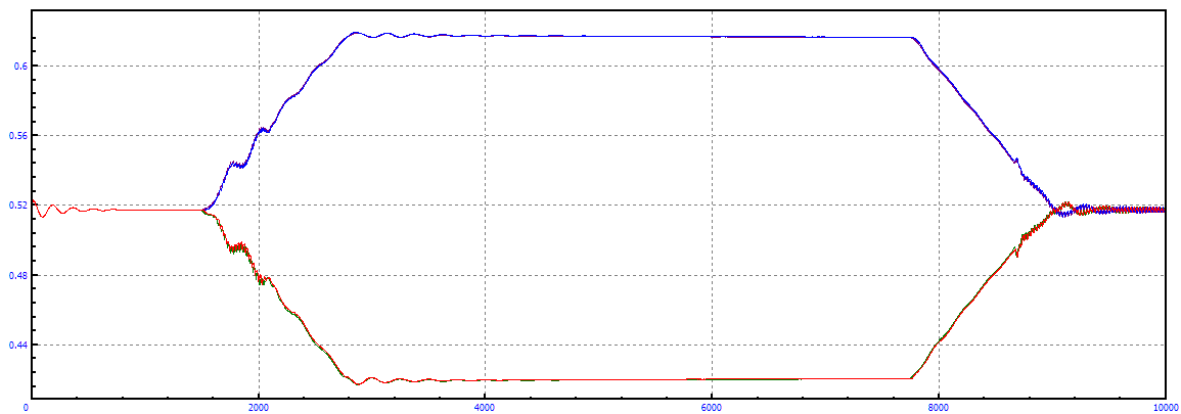


Figura A.500: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=150\text{m/s}$

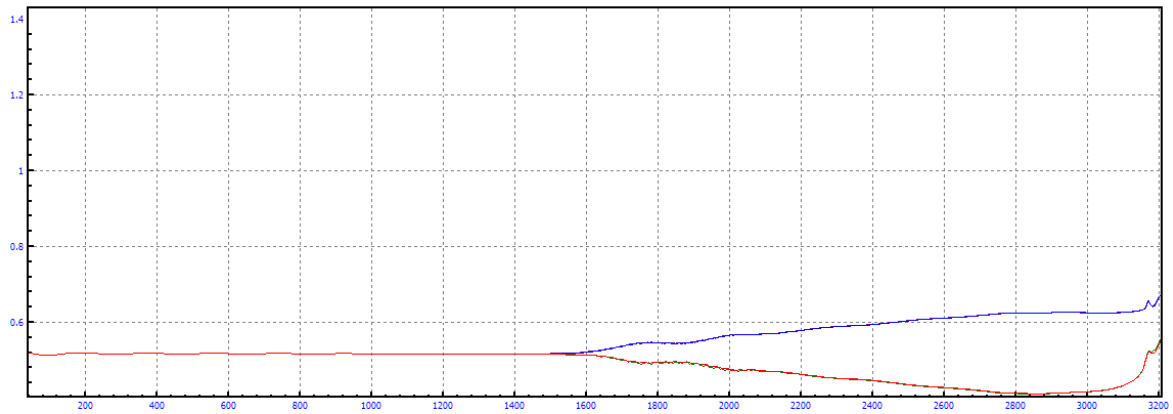


Figura A.501: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-40% y $V=155\text{m/s}$

B.3.4 MODIFICACIÓN=-20%

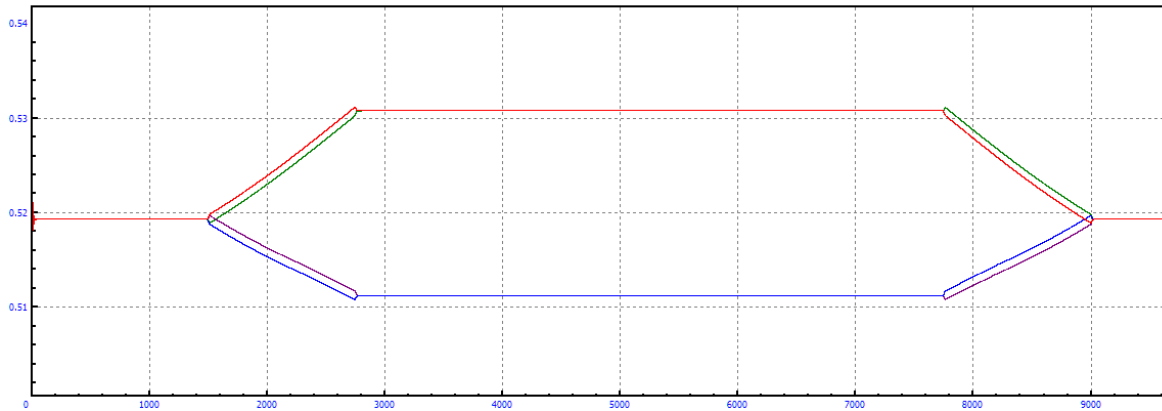


Figura A.502: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-20% y V=5m/s

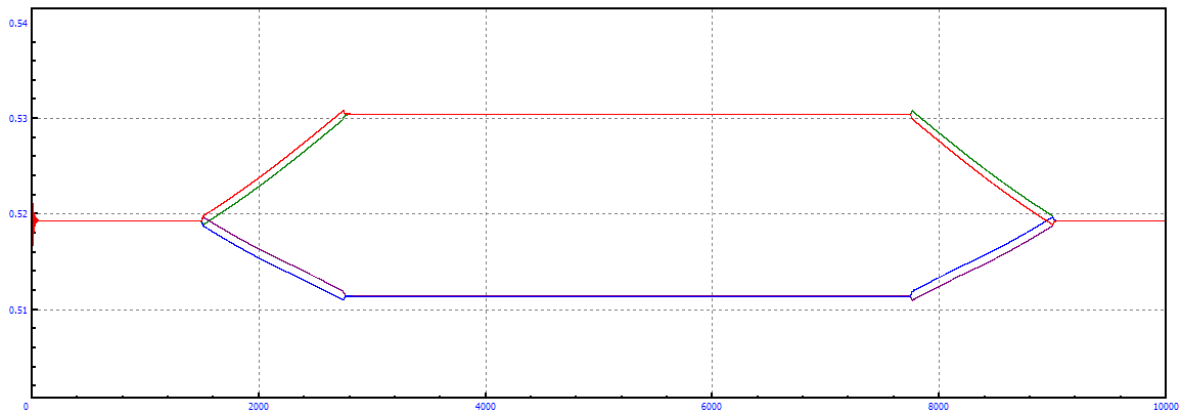


Figura A.503: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-20% y V=10m/s

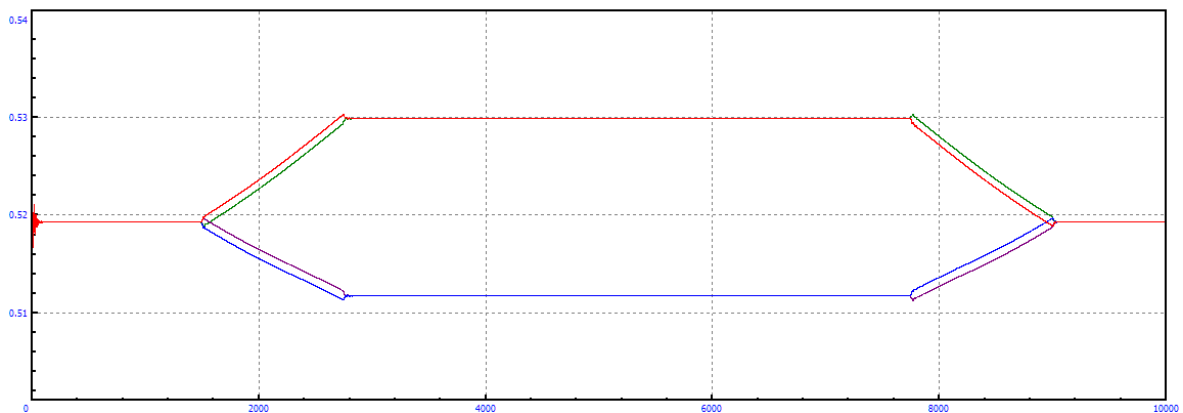


Figura A.504: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=-20% y V=15m/s

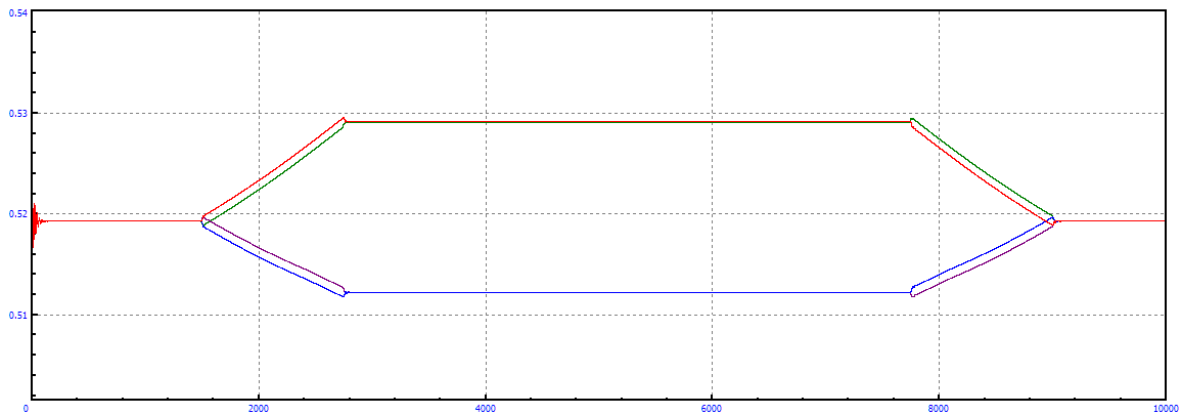


Figura A.505: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=20\text{m/s}$

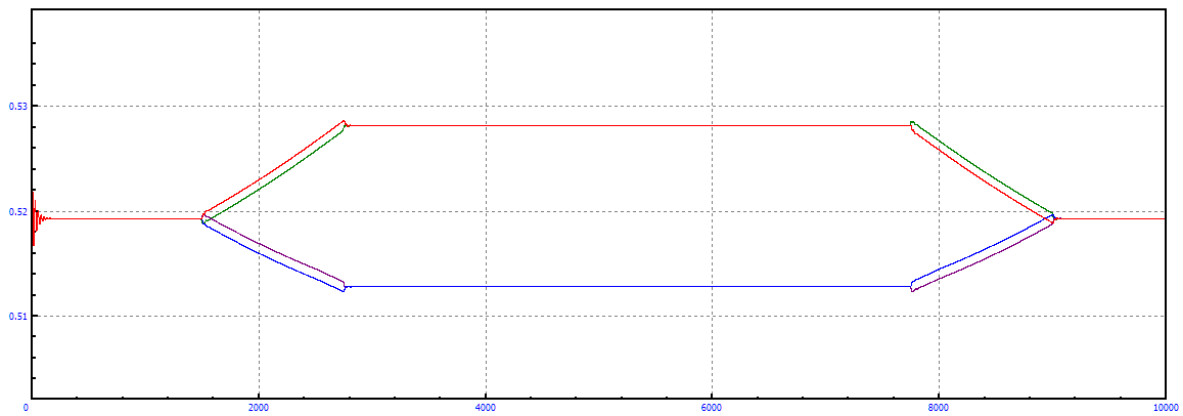


Figura A.506: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=25\text{m/s}$

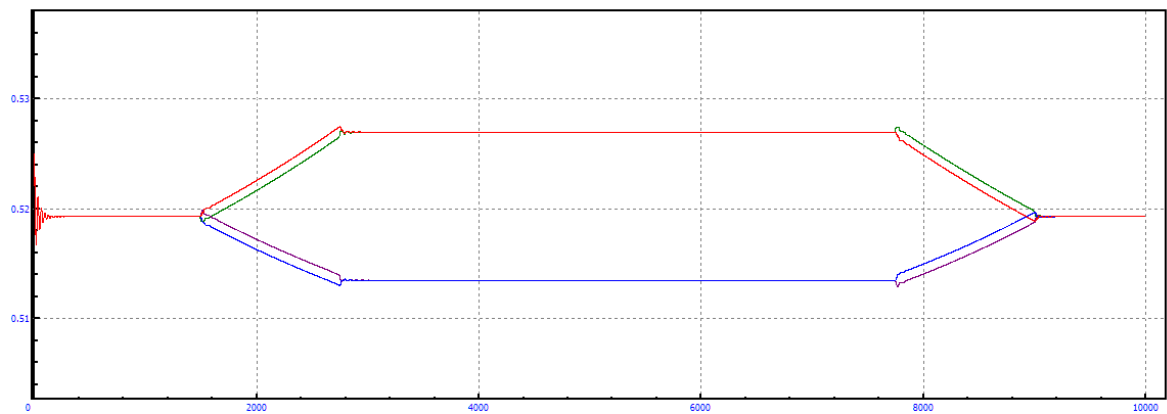


Figura A.507: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=30\text{m/s}$

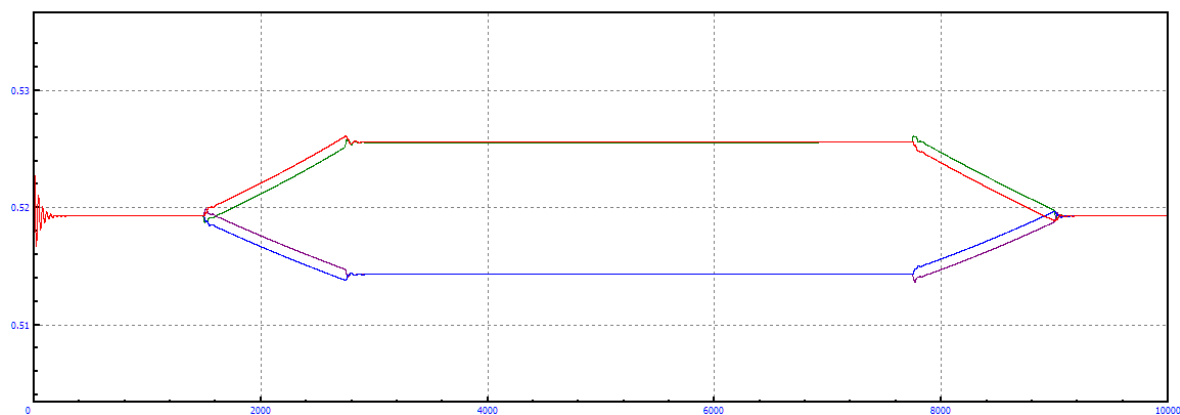


Figura A.508: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=35\text{m/s}$

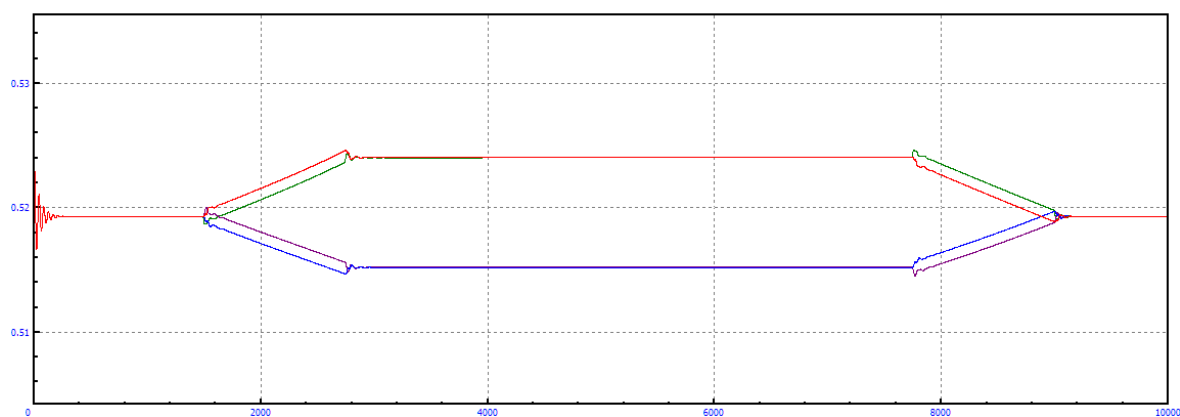


Figura A.509: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=40\text{m/s}$

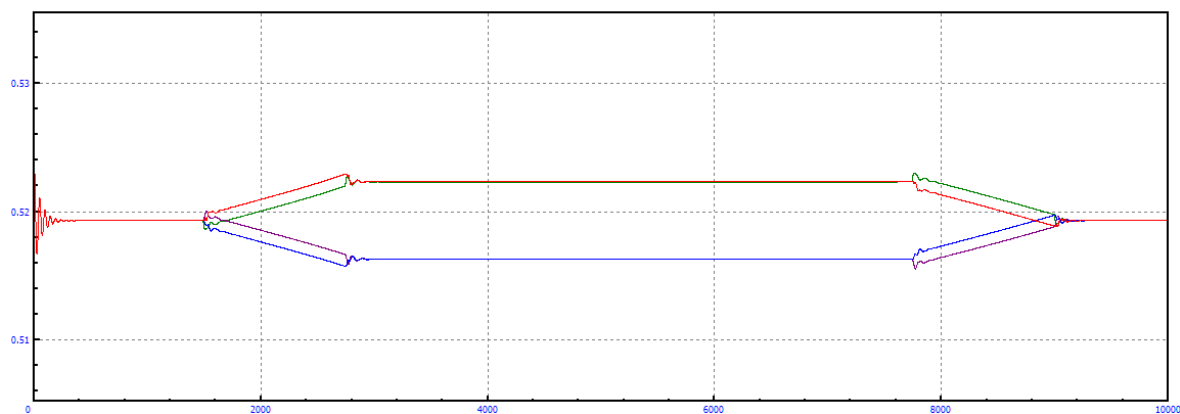


Figura A.510: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=45\text{m/s}$

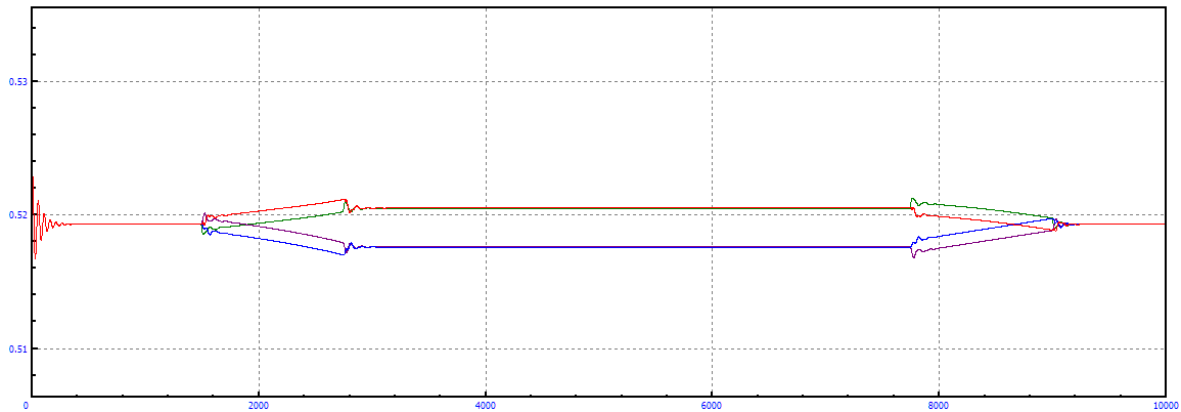


Figura A.511: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=50\text{m/s}$

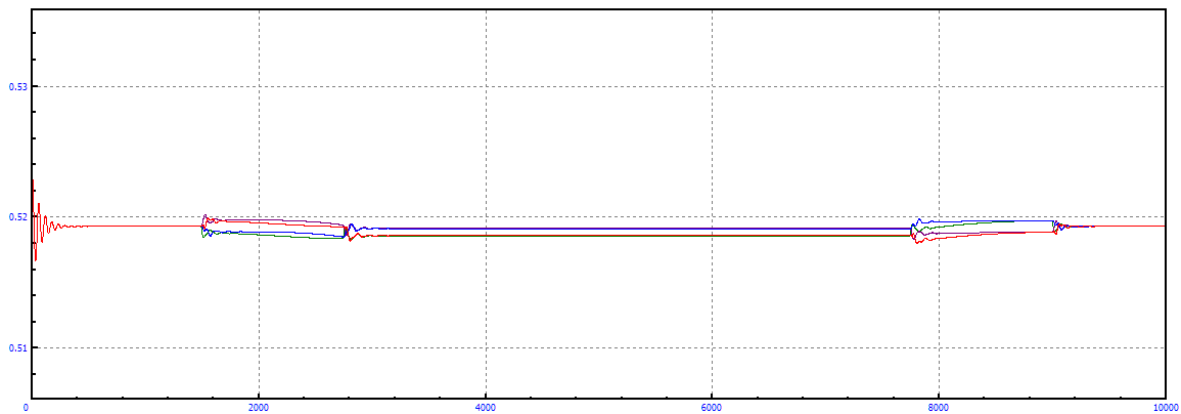


Figura A.512: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=55\text{m/s}$

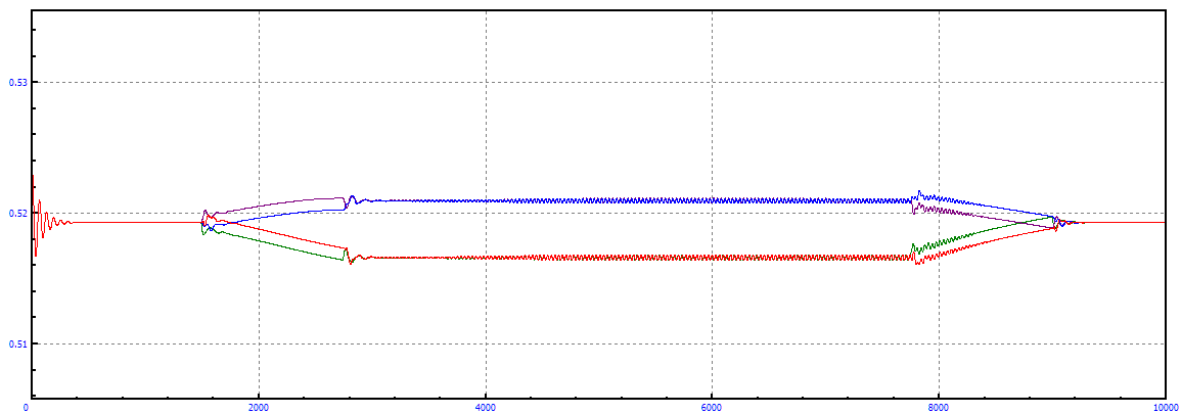


Figura A.513: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=60\text{m/s}$

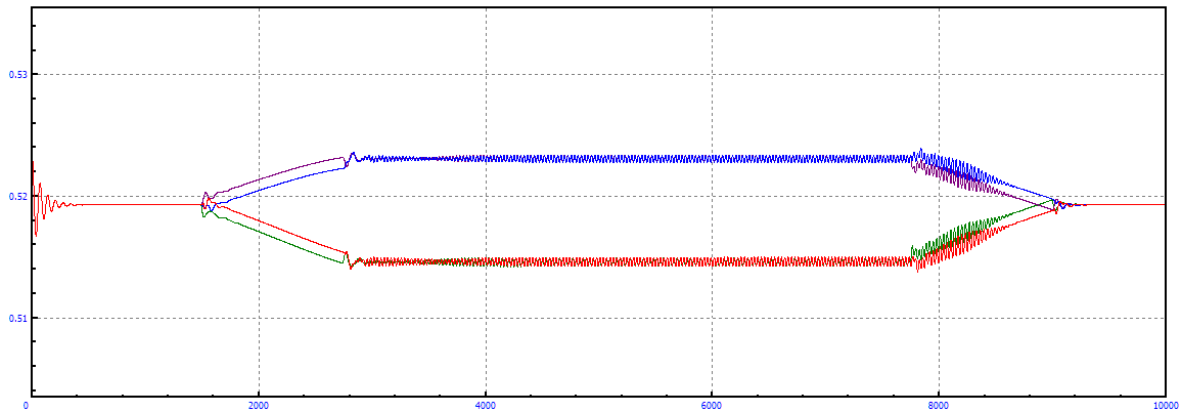


Figura A.514: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=65\text{m/s}$

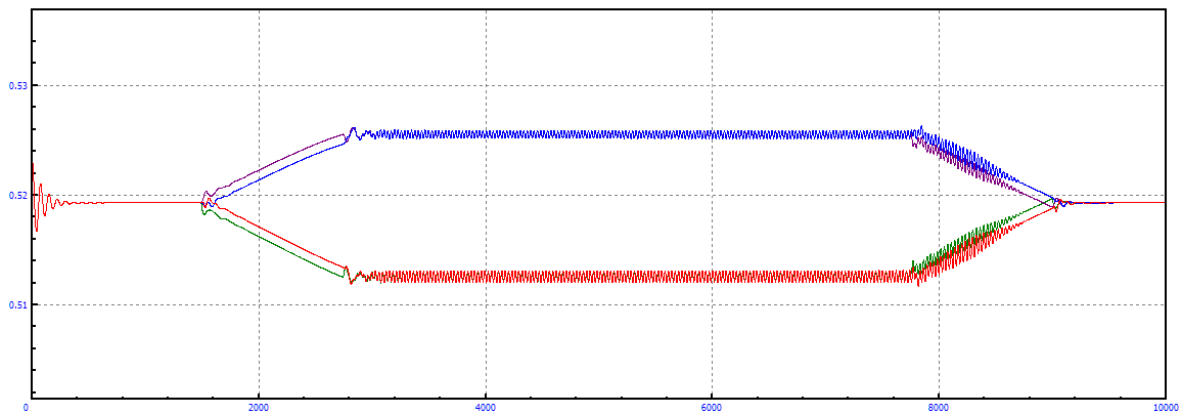


Figura A.515: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=70\text{m/s}$

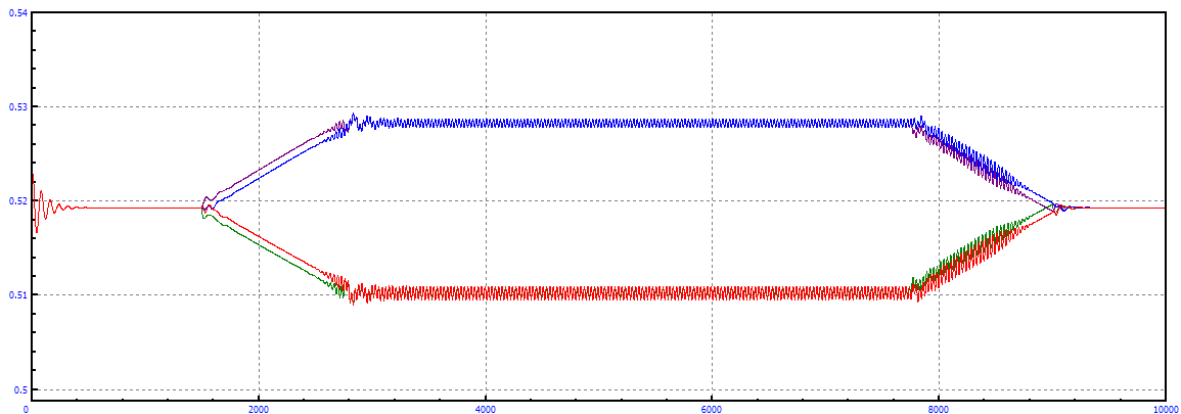


Figura A.516: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=75\text{m/s}$

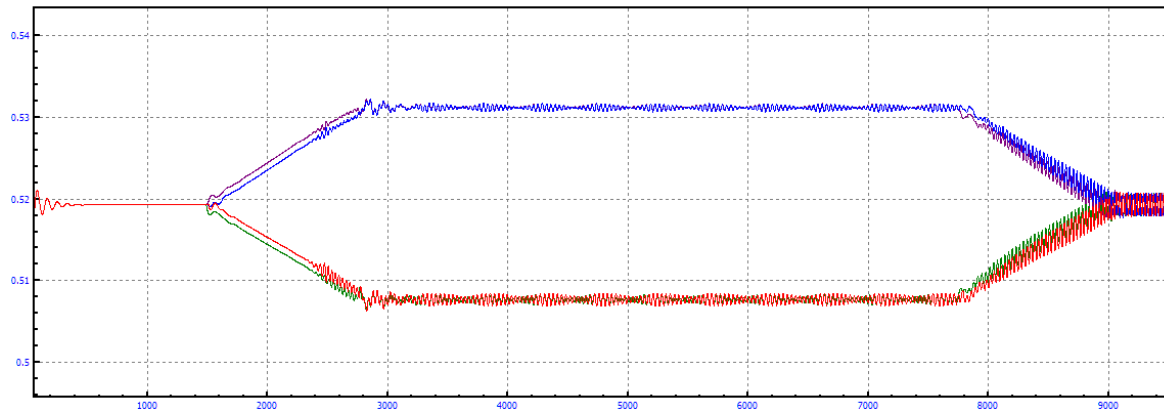


Figura A.517: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=80\text{m/s}$

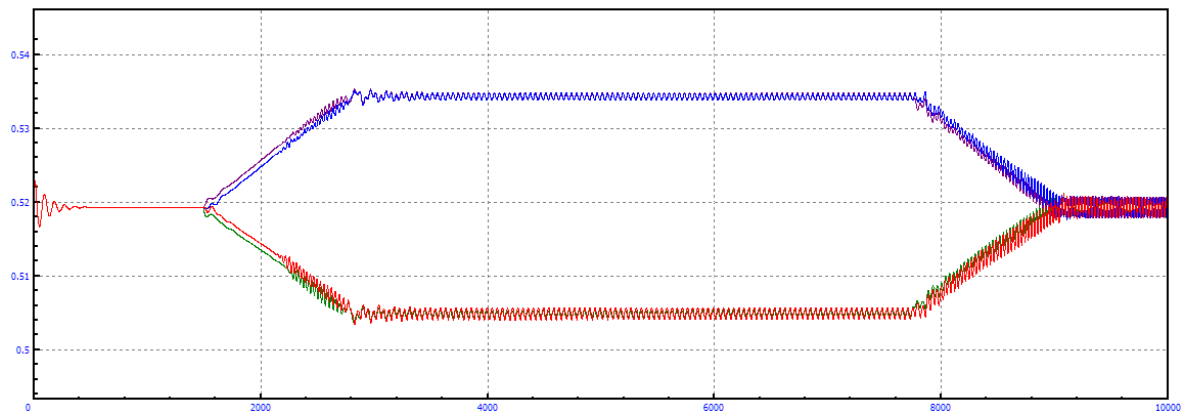


Figura A.518: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=85\text{m/s}$

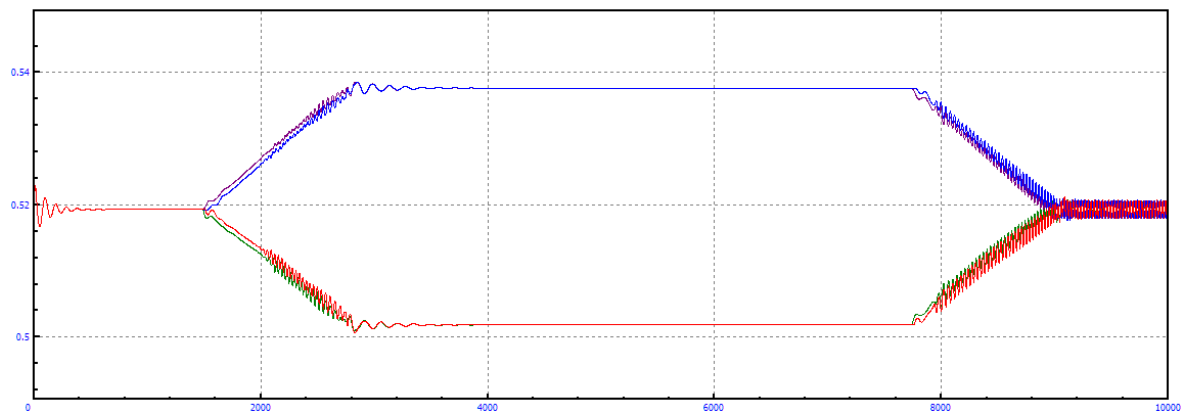


Figura A.519: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=90\text{m/s}$

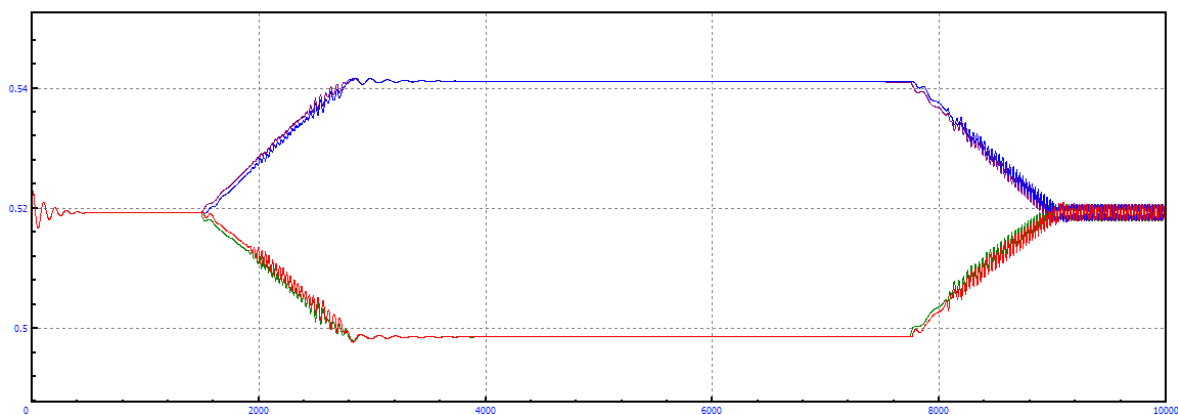


Figura A.520: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=-20\%$ y $V=95\text{m/s}$

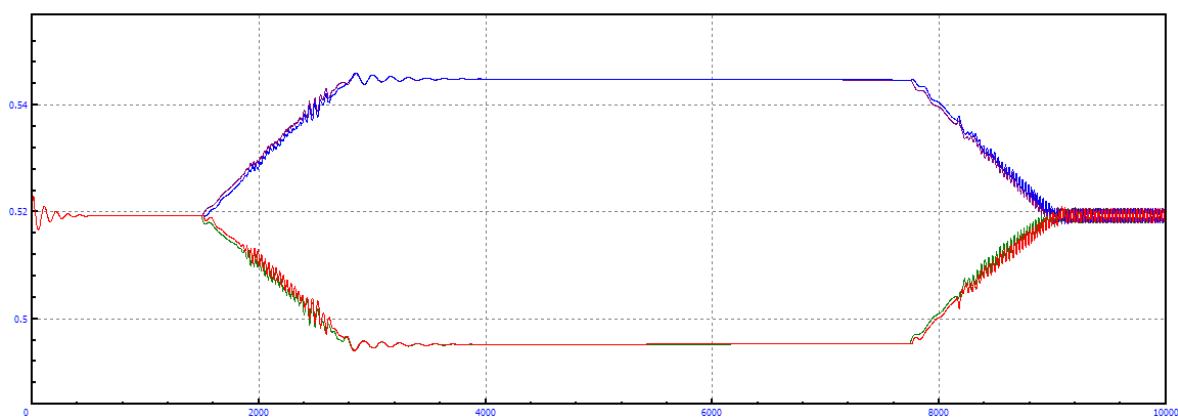


Figura A.521: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=-20\%$ y $V=100\text{m/s}$

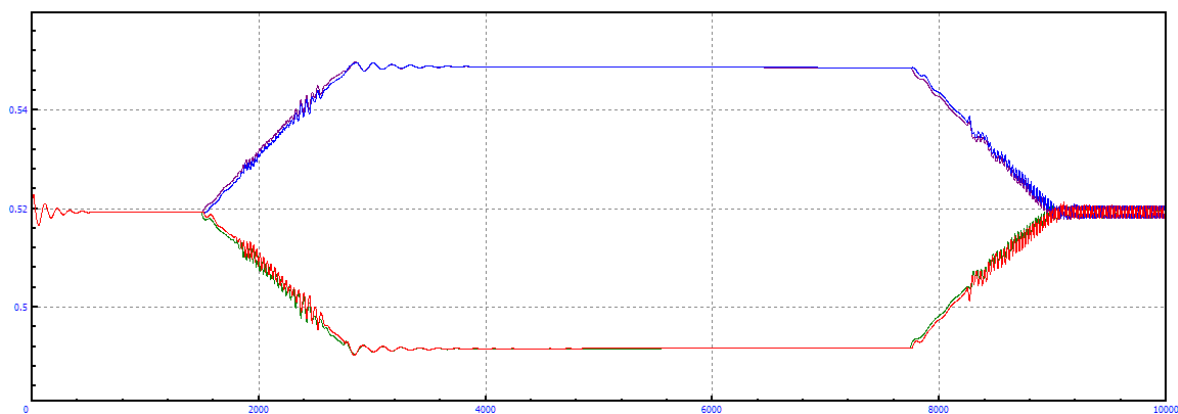


Figura A.522: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=-20\%$ y $V=105\text{m/s}$

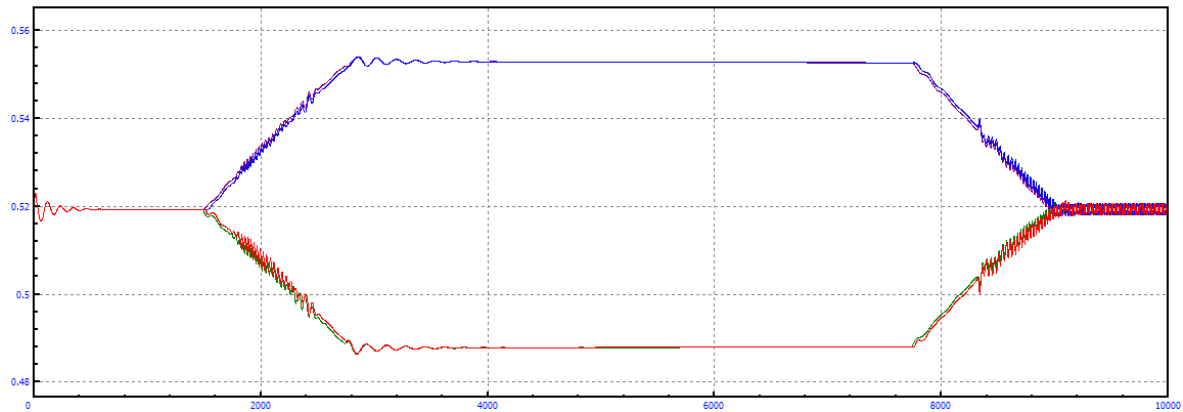


Figura A.523: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=110\text{m/s}$

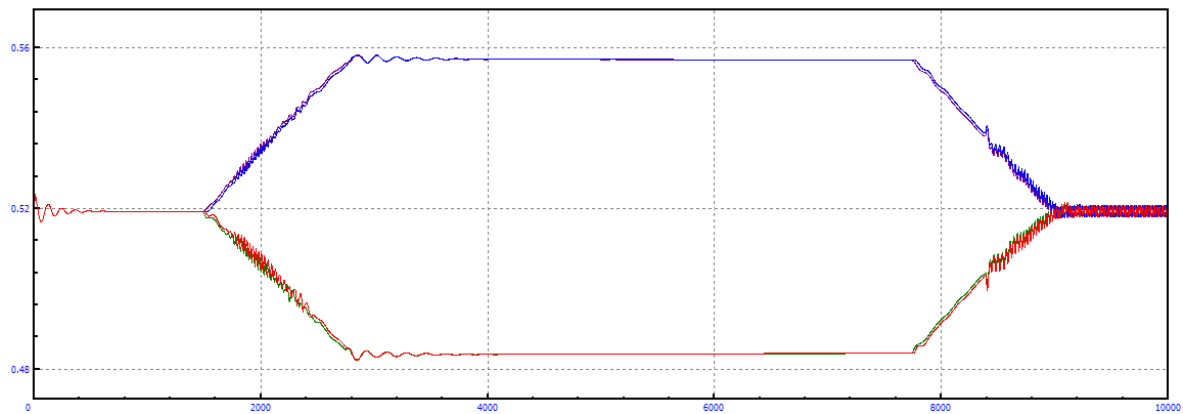


Figura A.524: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=115\text{m/s}$

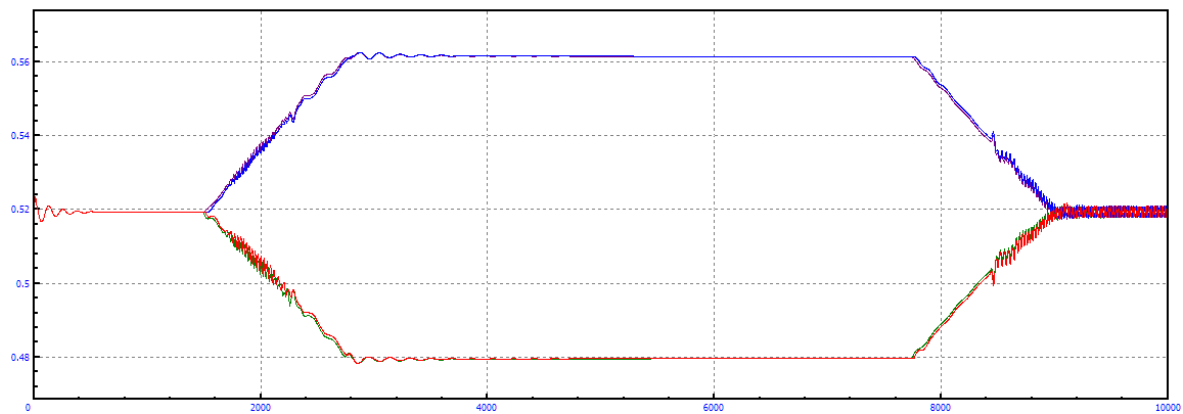


Figura A.525: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=120\text{m/s}$

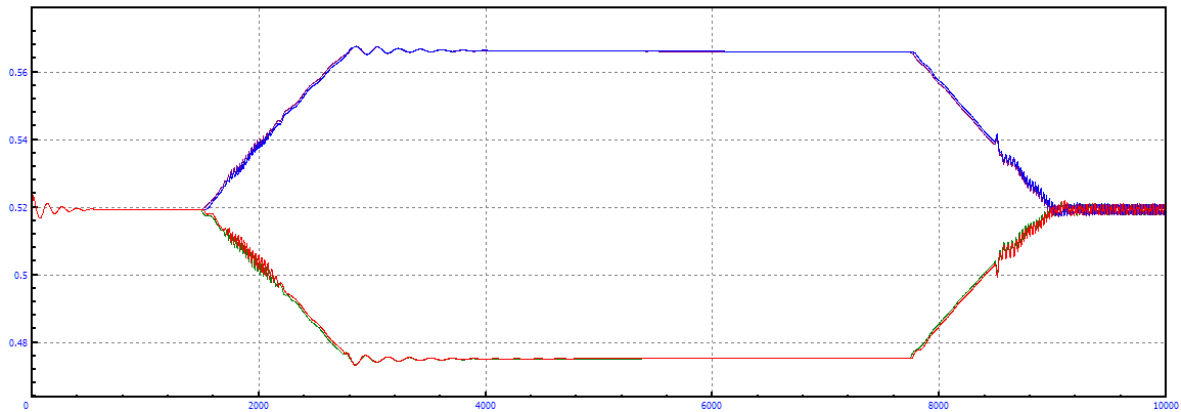


Figura A.526: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=125\text{m/s}$

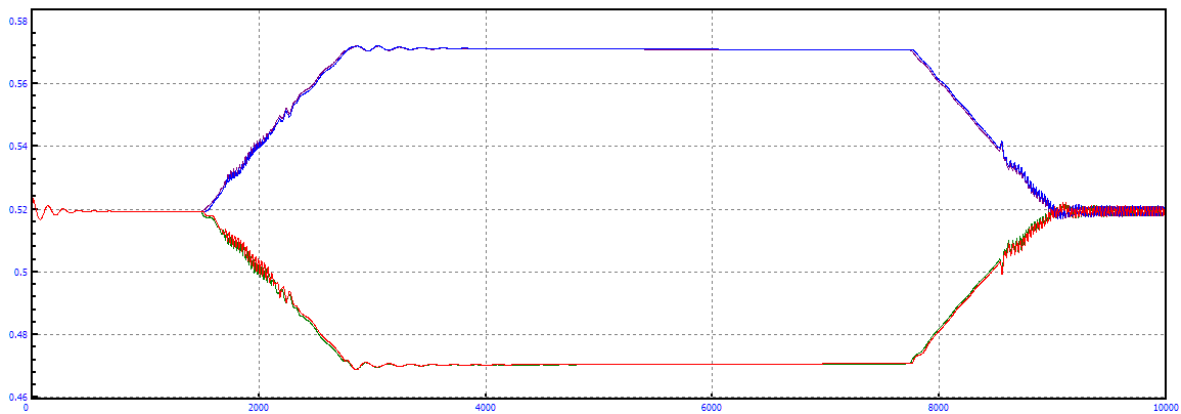


Figura A.527: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=130\text{m/s}$

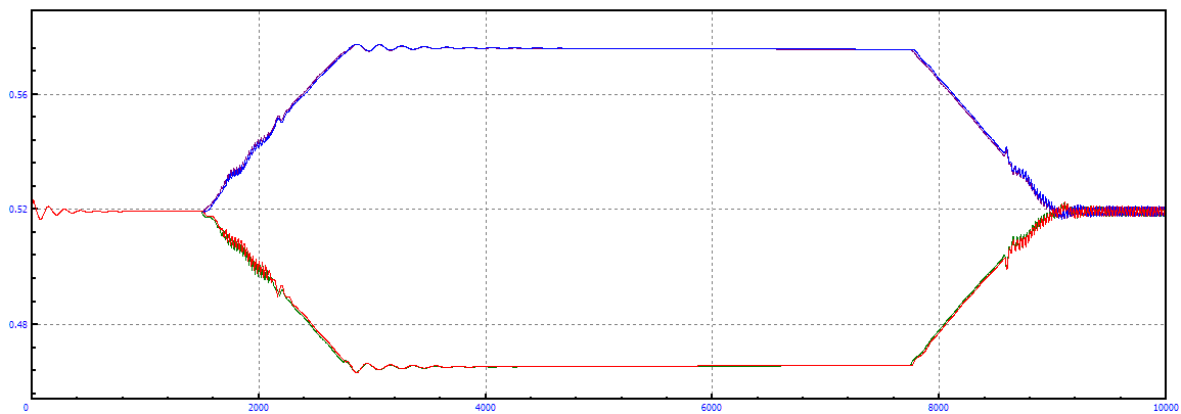


Figura A.528: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=135\text{m/s}$

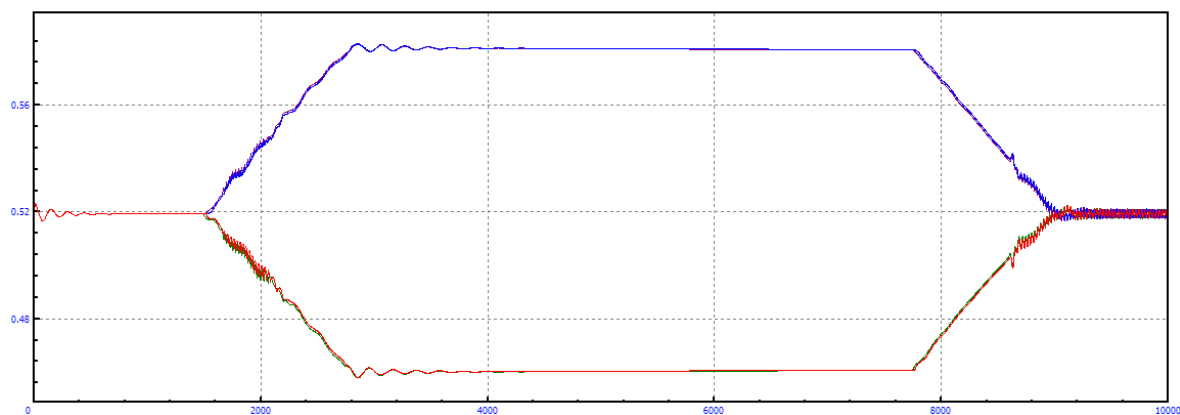


Figura A.529: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=140\text{m/s}$

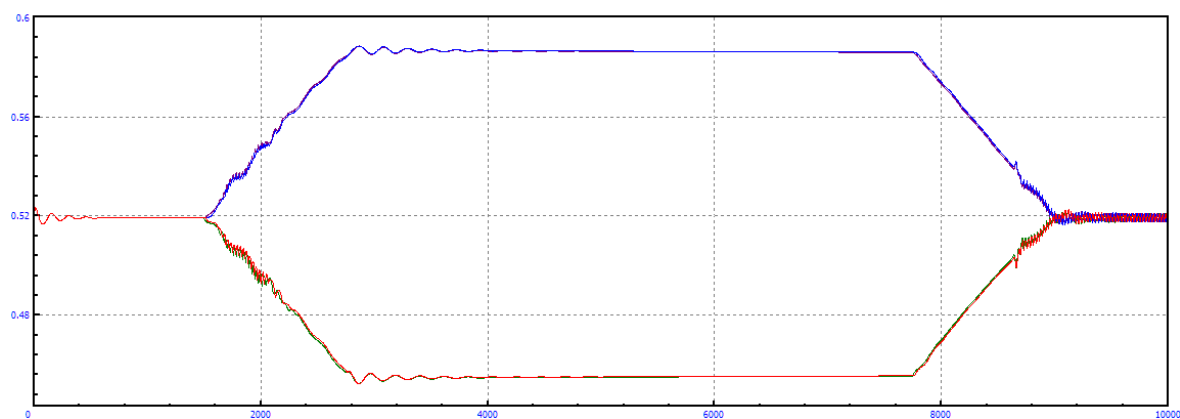


Figura A.530: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=145\text{m/s}$

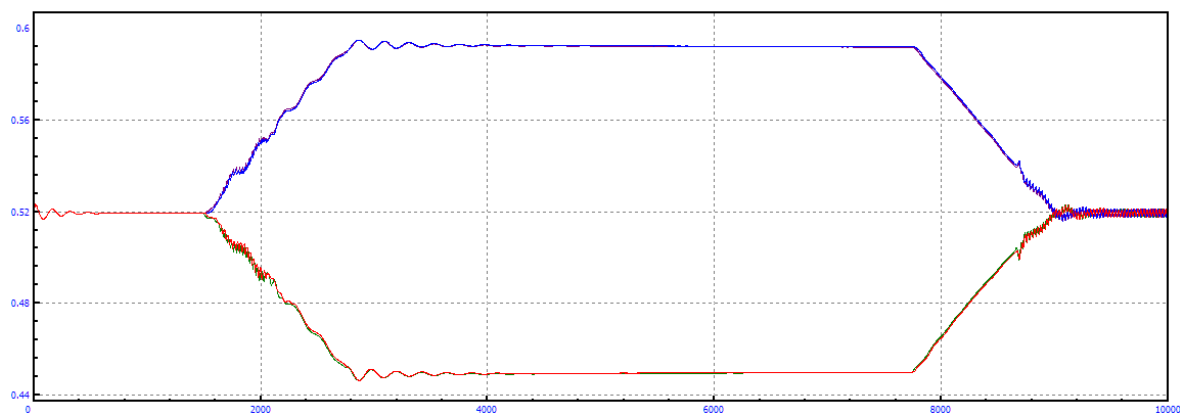


Figura A.531: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=150\text{m/s}$

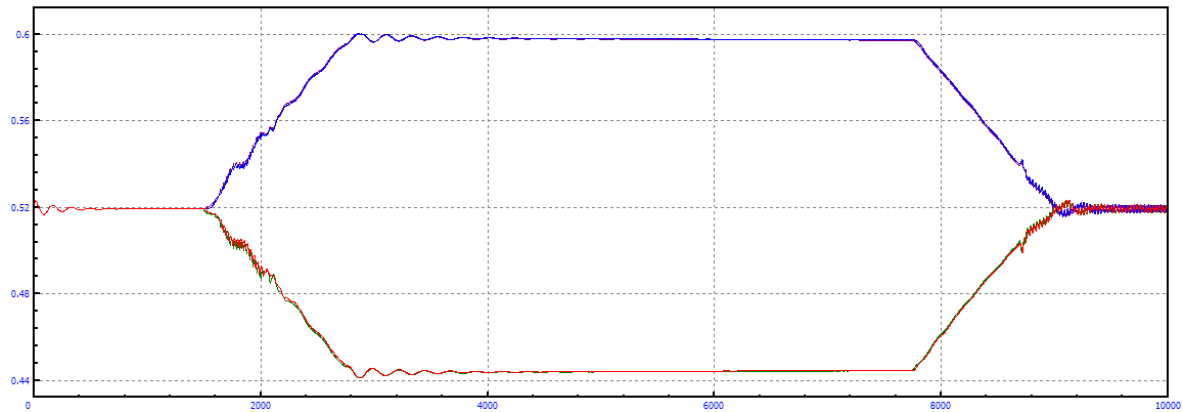


Figura A.532: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=155\text{m/s}$

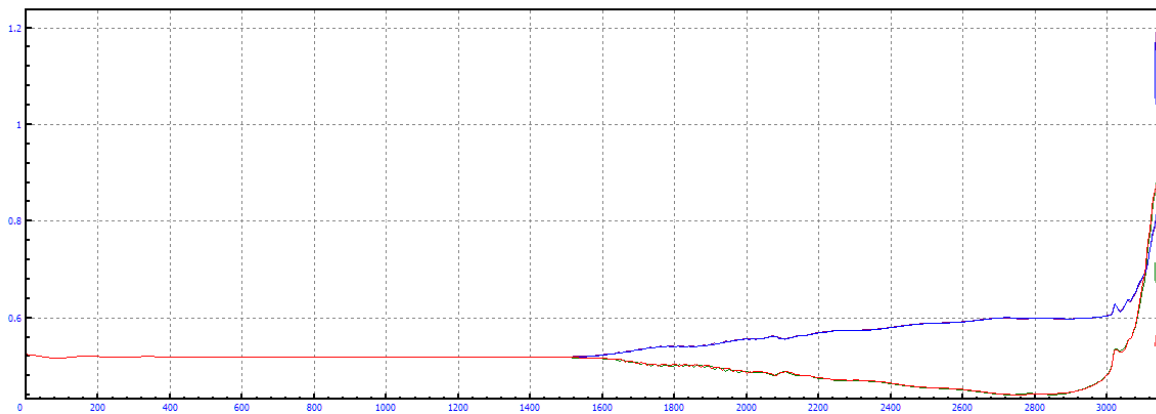


Figura A.533: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=-20% y $V=160\text{m/s}$

B.3.5 MODIFICACIÓN= 0% (POR DEFECTO)

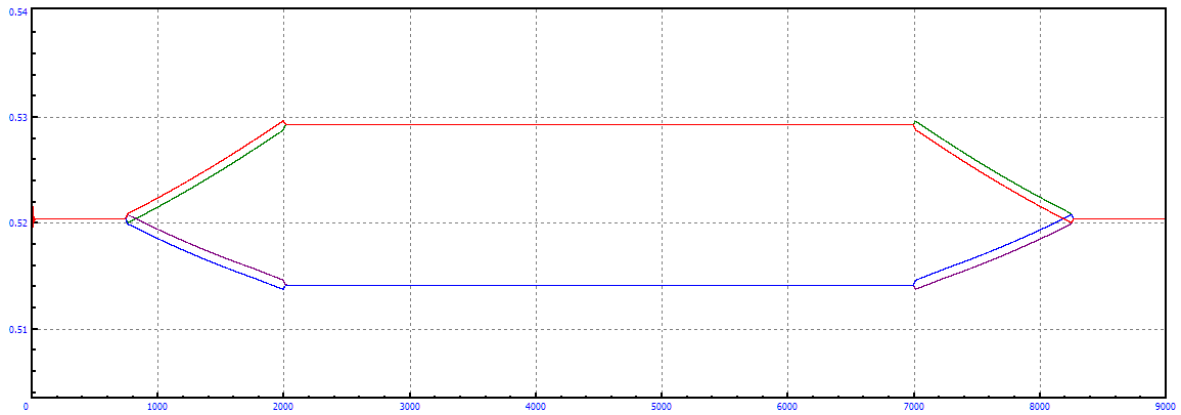


Figura A.534: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=0% y V=5m/s

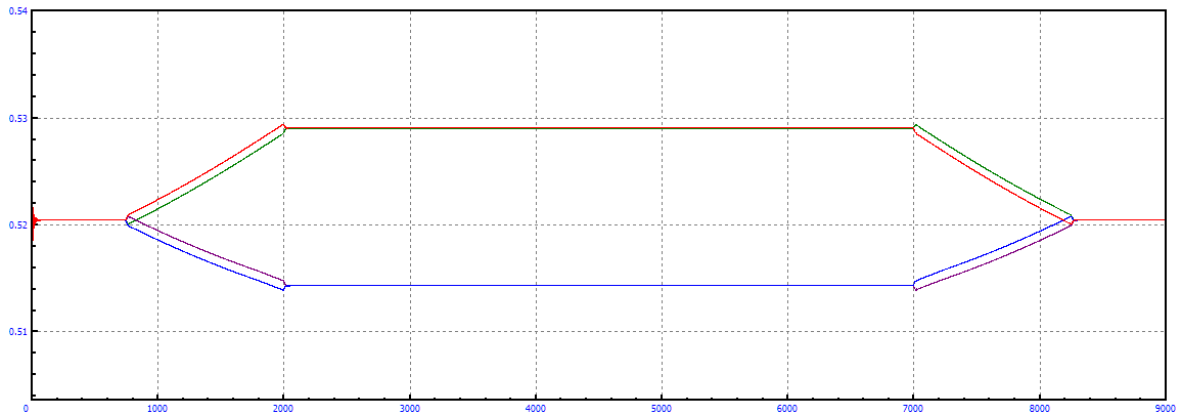


Figura A.535: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=0% y V=10m/s

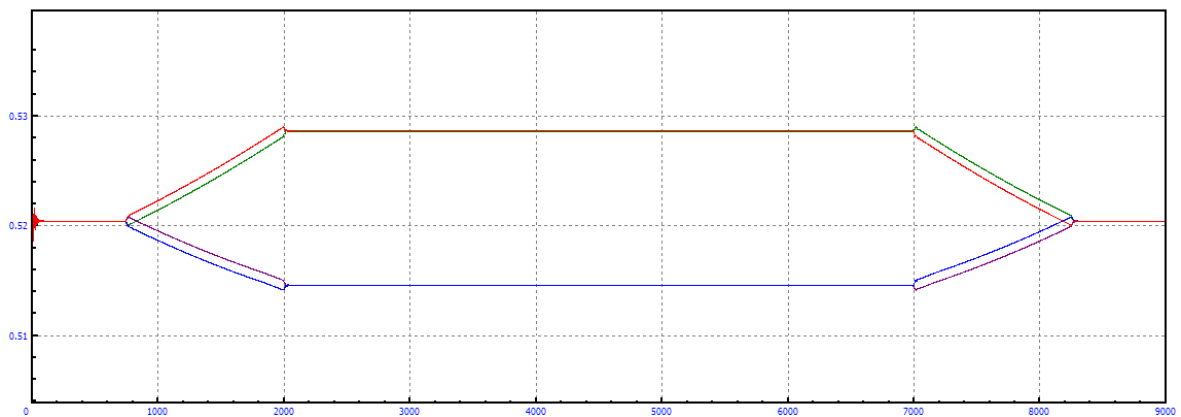


Figura A.536: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=0% y V=15m/s

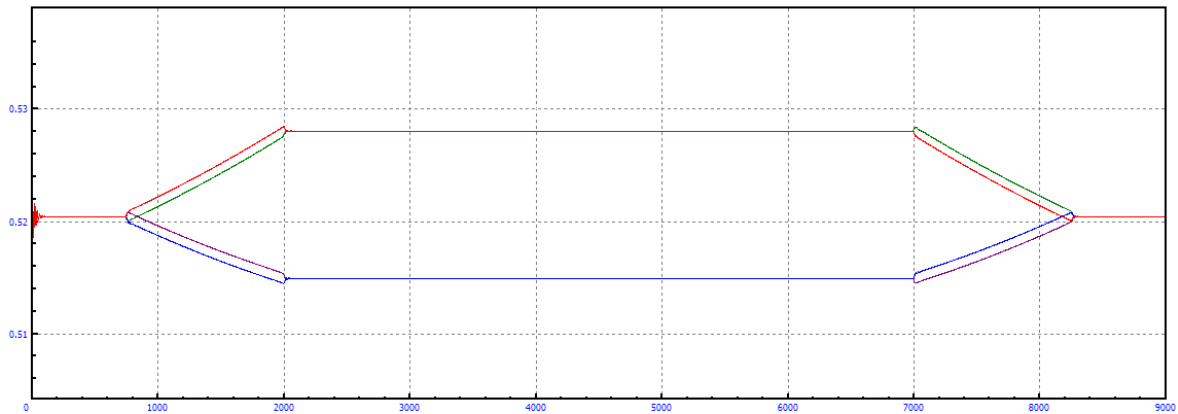


Figura A.537: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=20\text{m/s}$

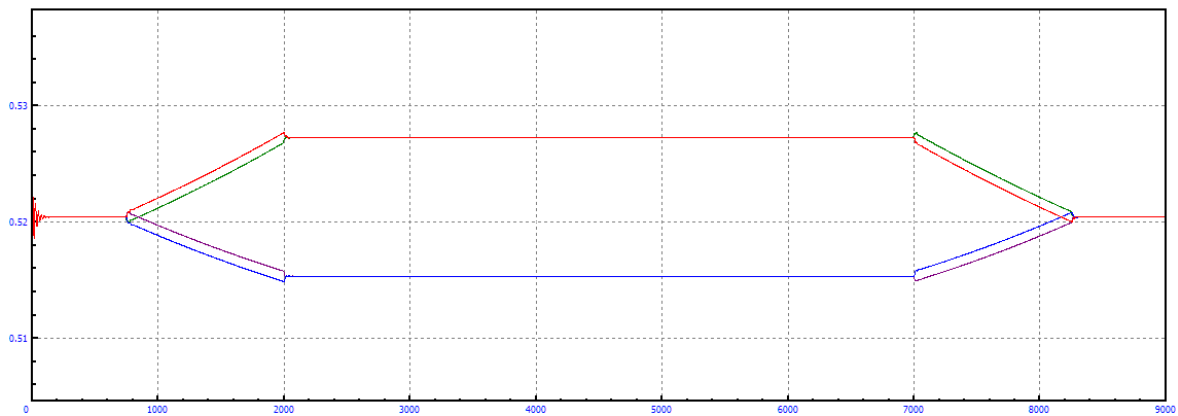


Figura A.538: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=25\text{m/s}$

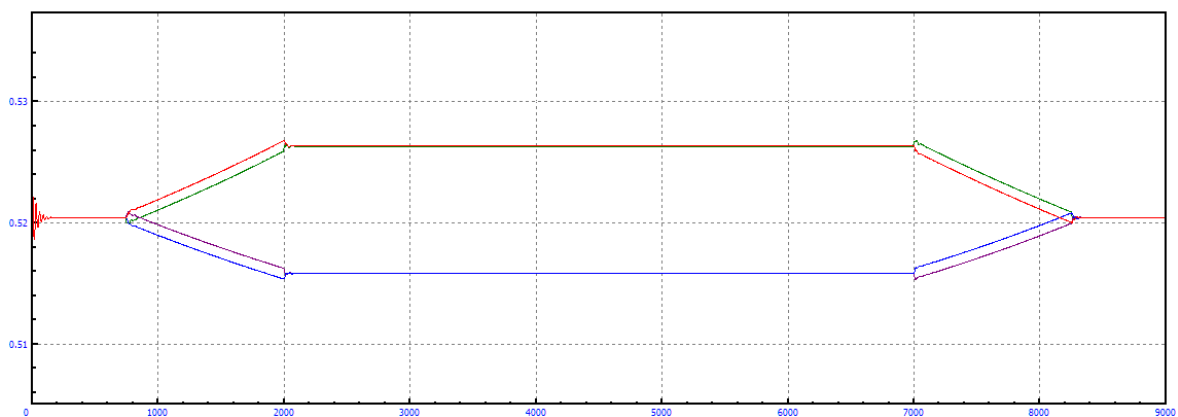


Figura A.539: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=30\text{m/s}$

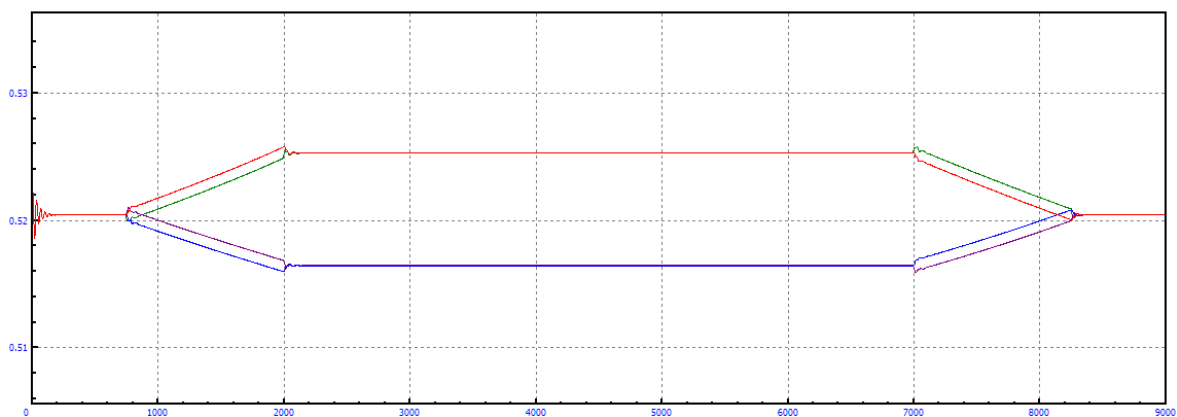


Figura A.540: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=35\text{m/s}$

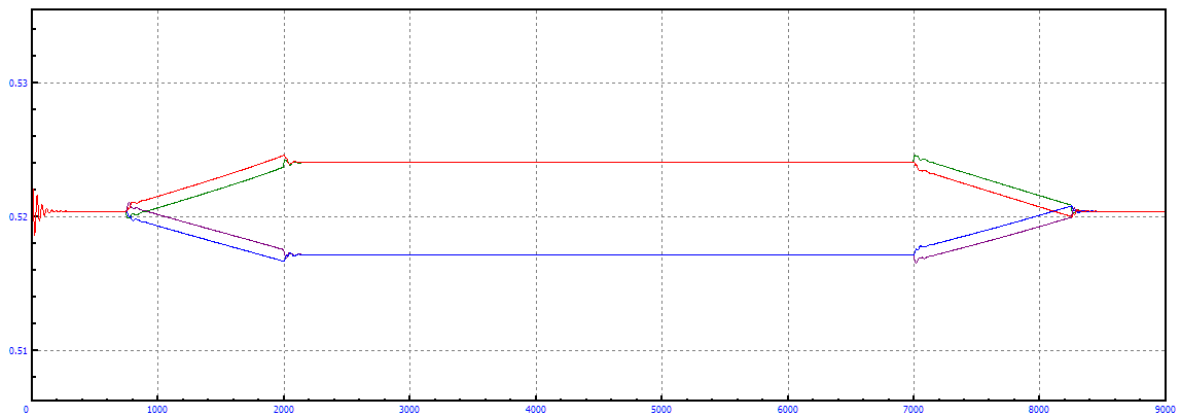


Figura A.541: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=40\text{m/s}$

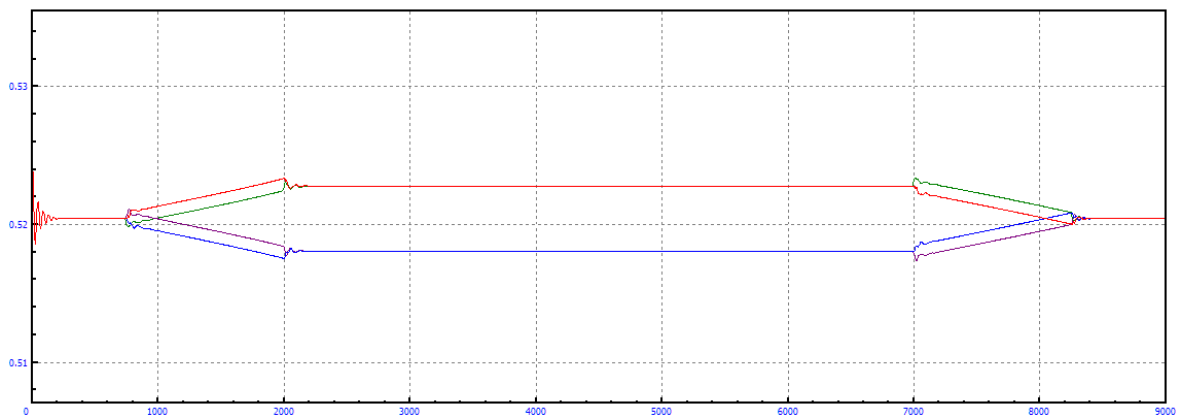


Figura A.542: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=45\text{m/s}$

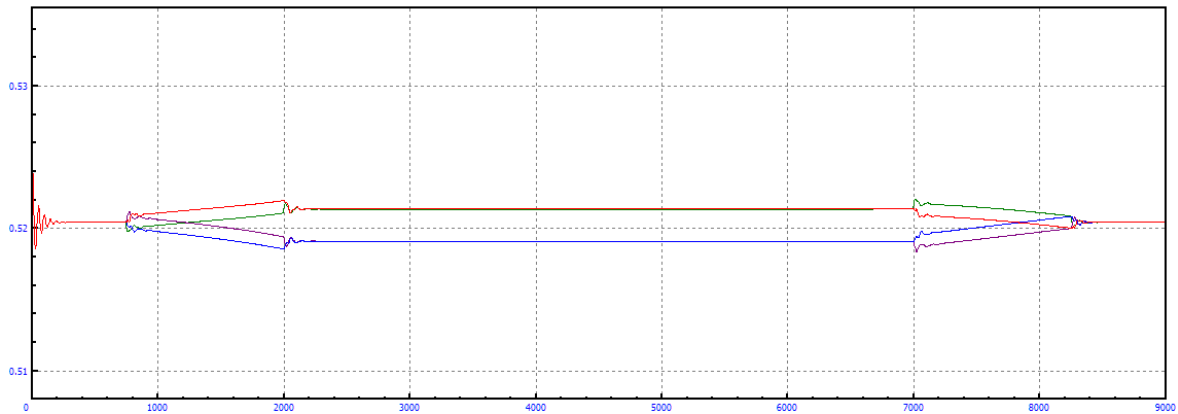


Figura A.543: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=50\text{m/s}$

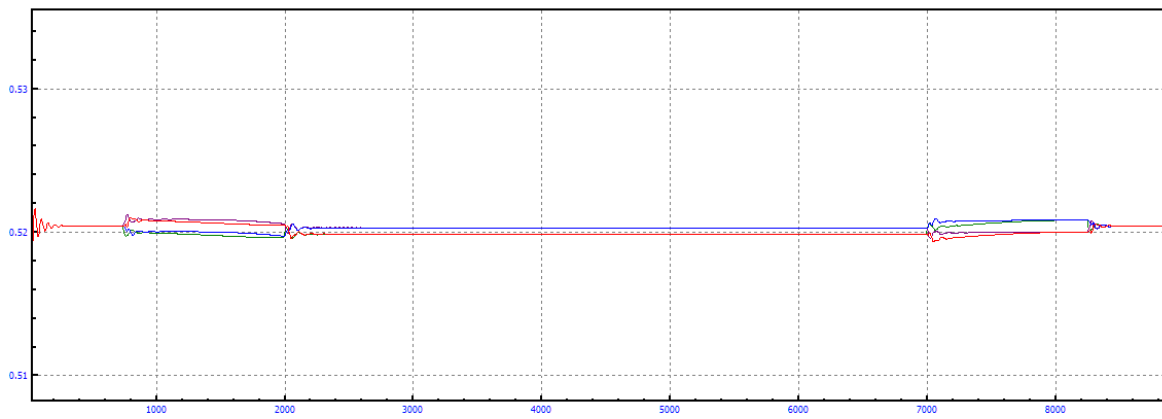


Figura A.544: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=55\text{m/s}$

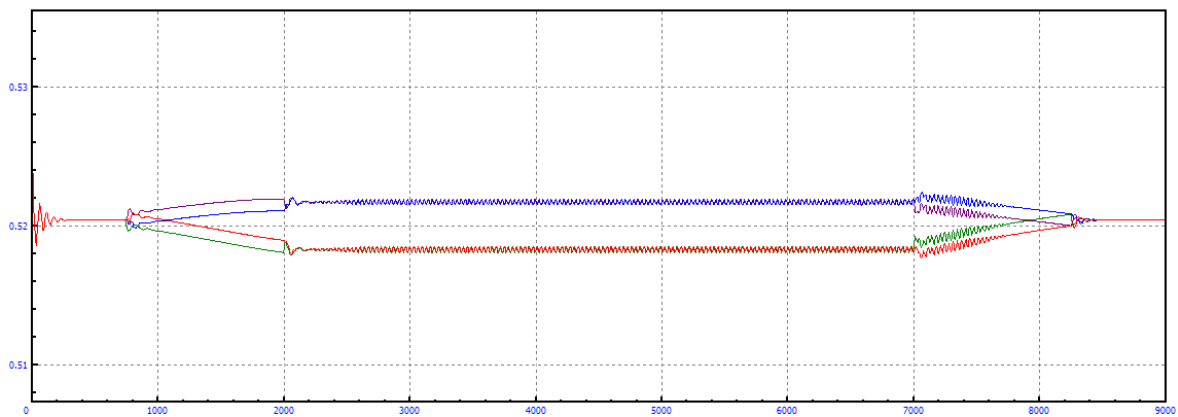


Figura A.545: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=60\text{m/s}$

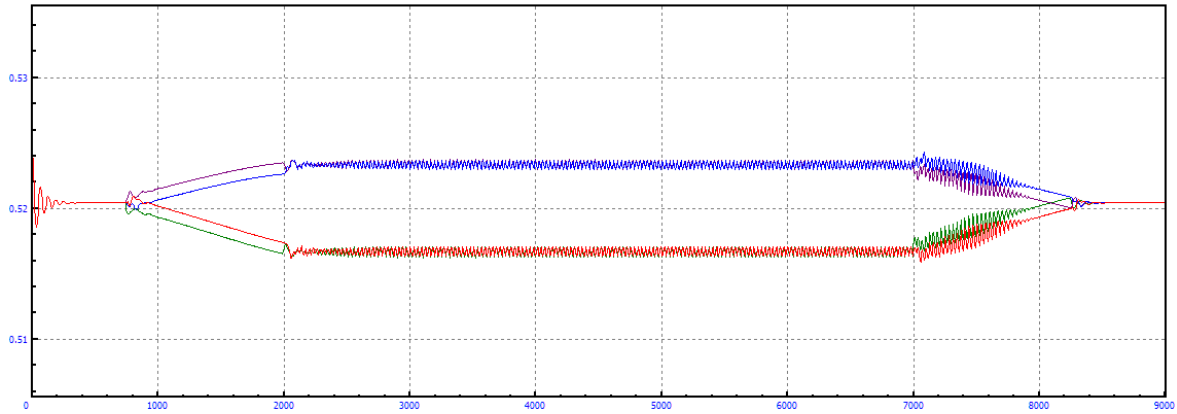


Figura A.546: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=65\text{m/s}$

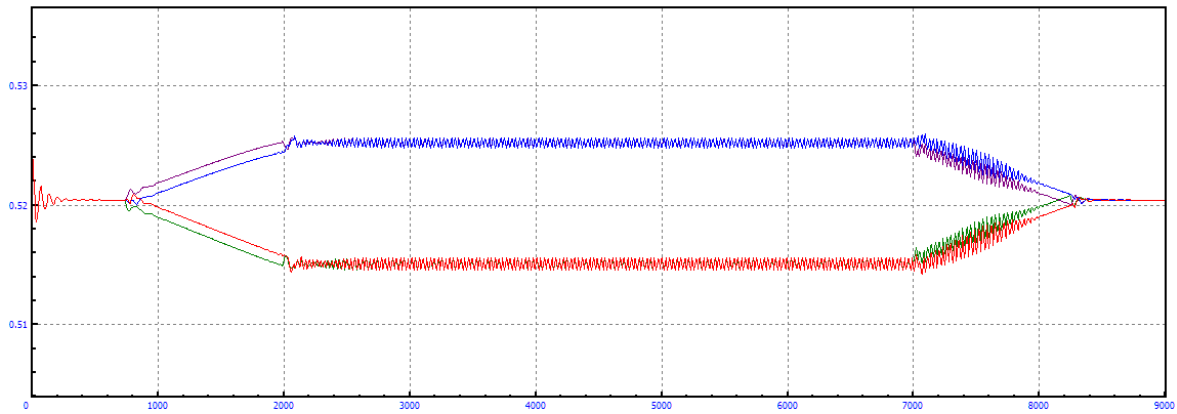


Figura A.547: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=70\text{m/s}$

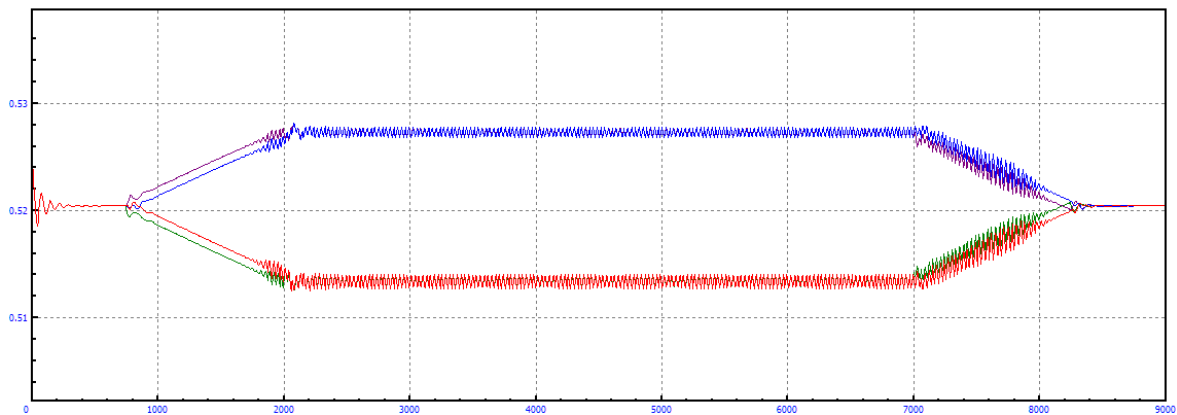


Figura A.548: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=75\text{m/s}$

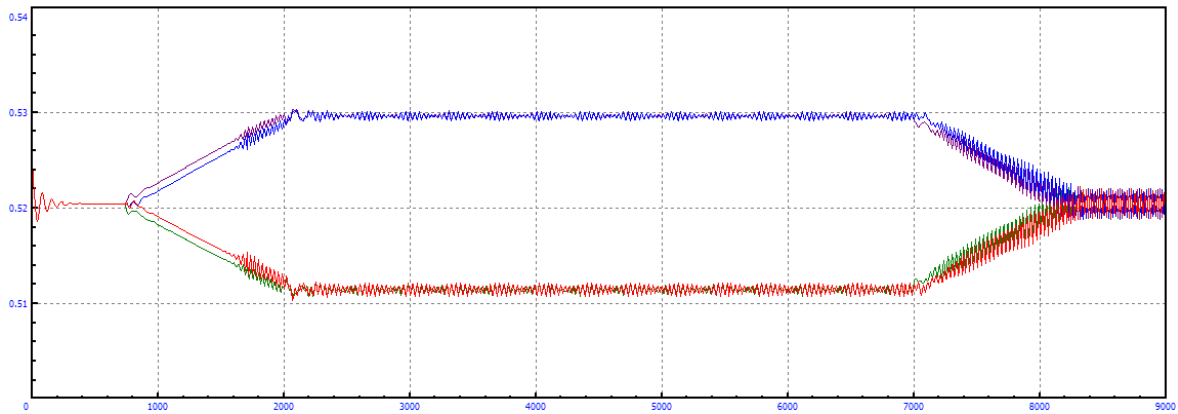


Figura A.549: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=80\text{m/s}$

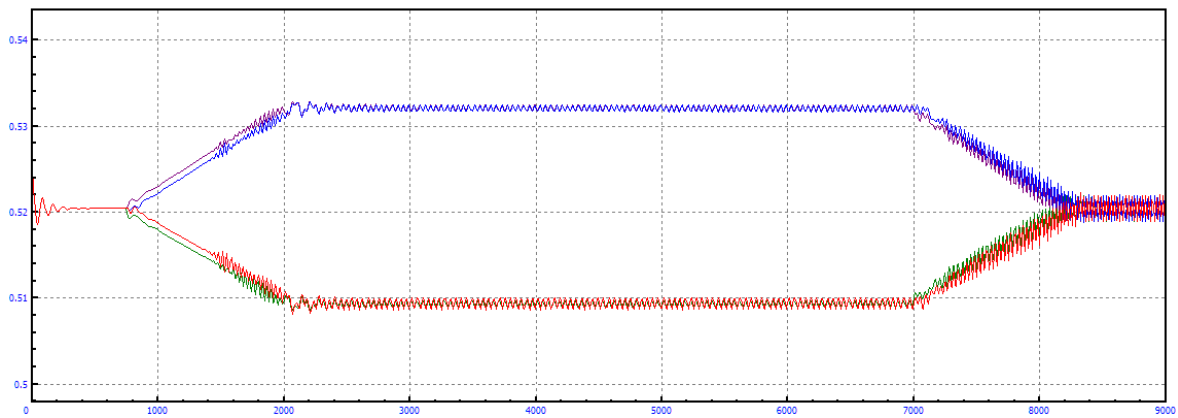


Figura A.550: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=85\text{m/s}$

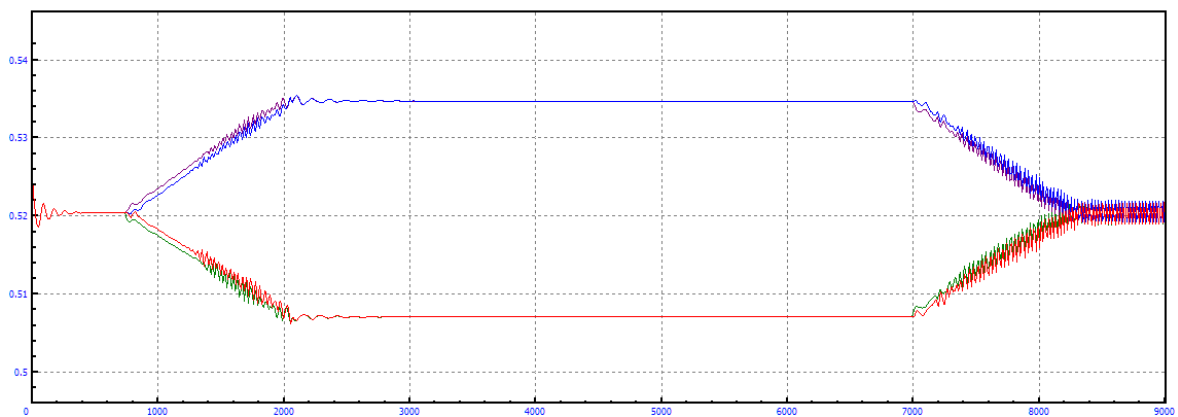


Figura A.551: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=90\text{m/s}$

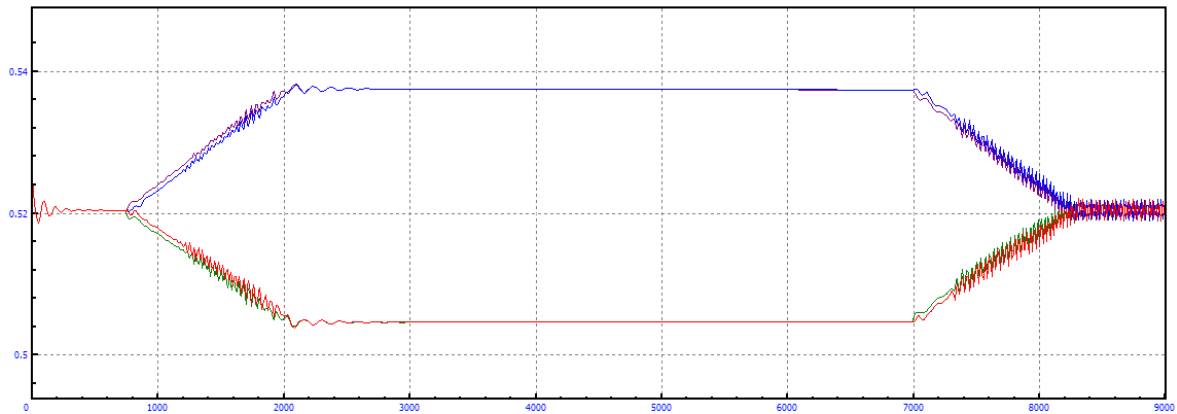


Figura A.552: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=95\text{m/s}$

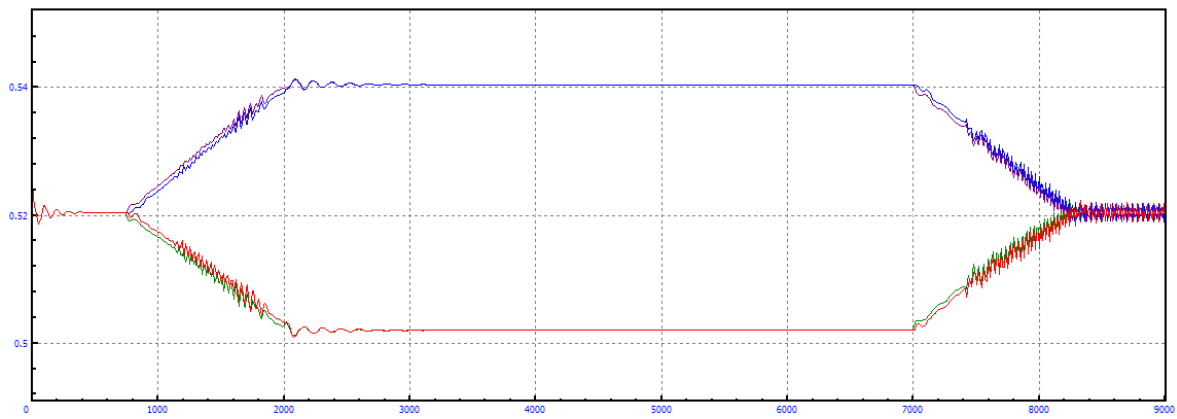


Figura A.553: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=100\text{m/s}$

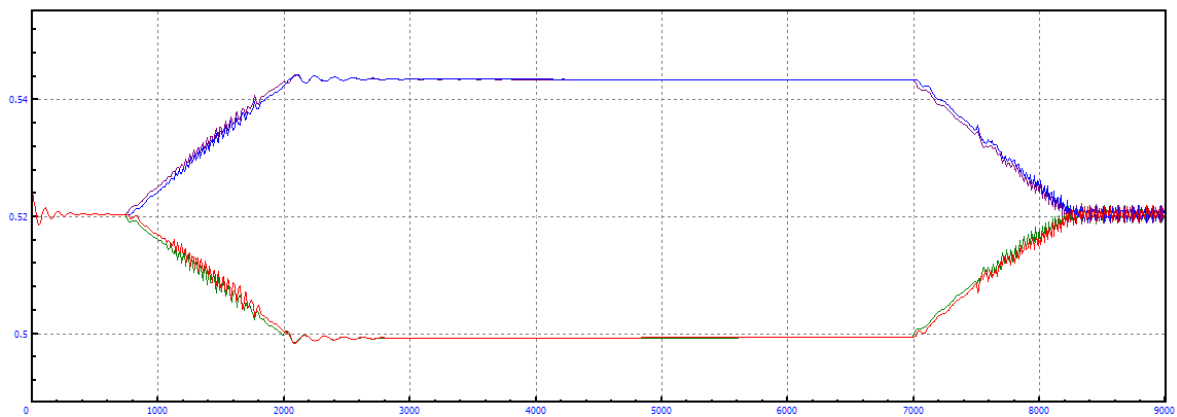


Figura A.554: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=105\text{m/s}$

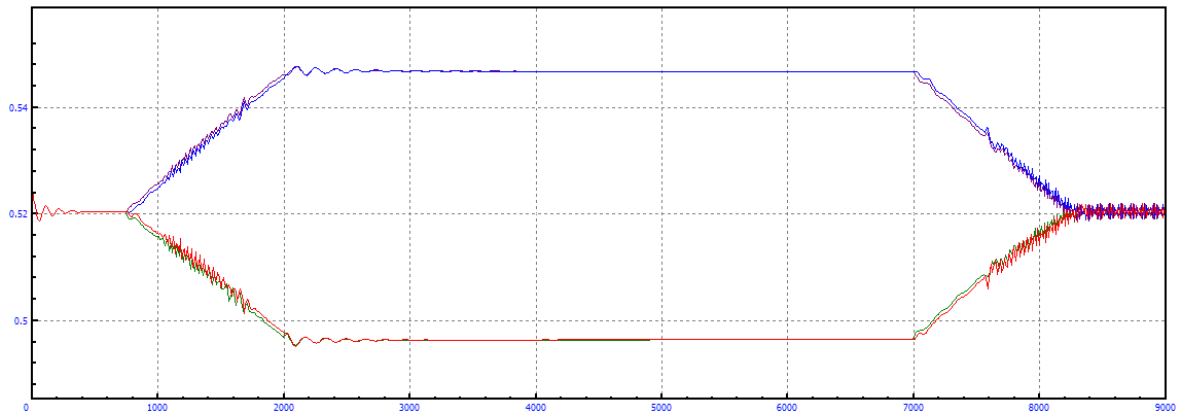


Figura A.555: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=110\text{m/s}$

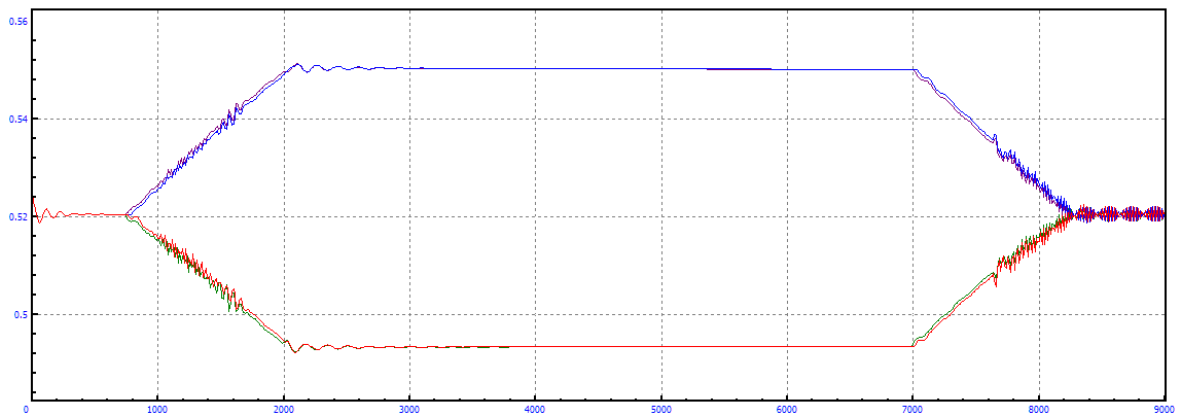


Figura A.556: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=115\text{m/s}$

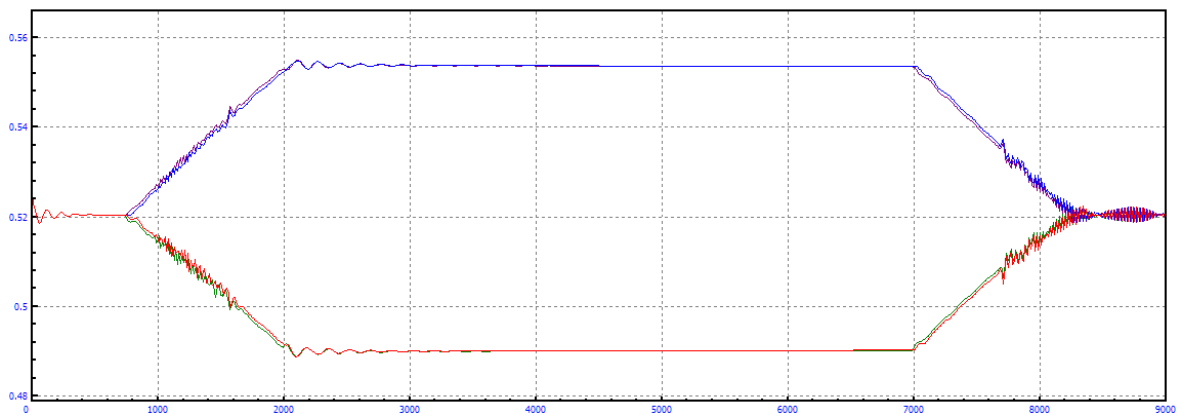


Figura A.557: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=120\text{m/s}$

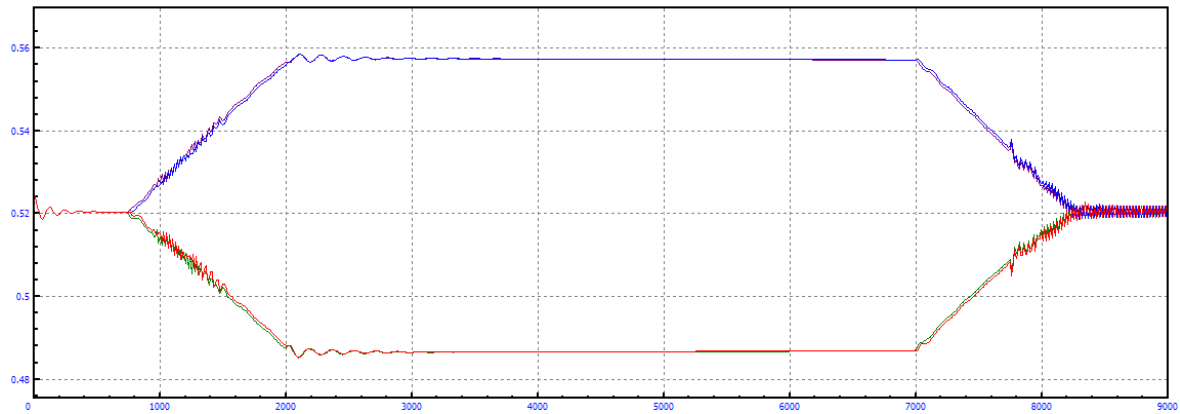


Figura A.558: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=125\text{m/s}$

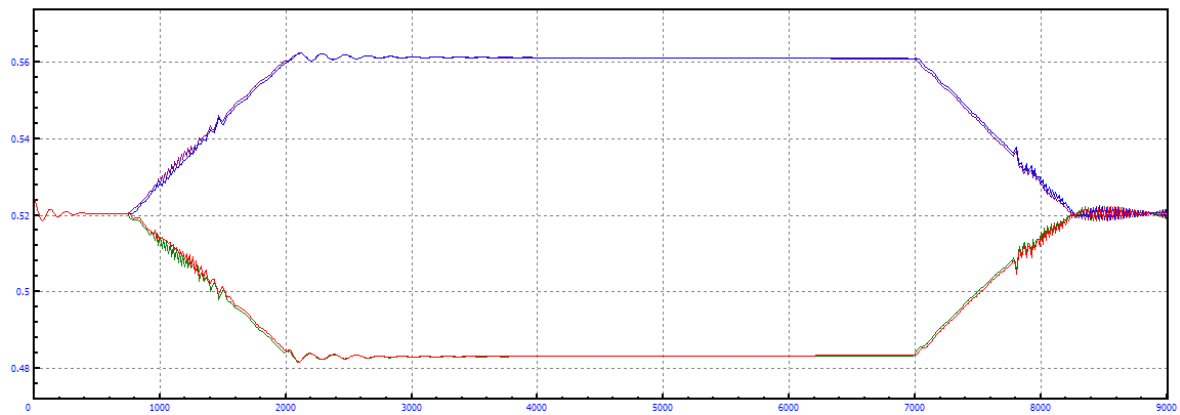


Figura A.559: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=130\text{m/s}$

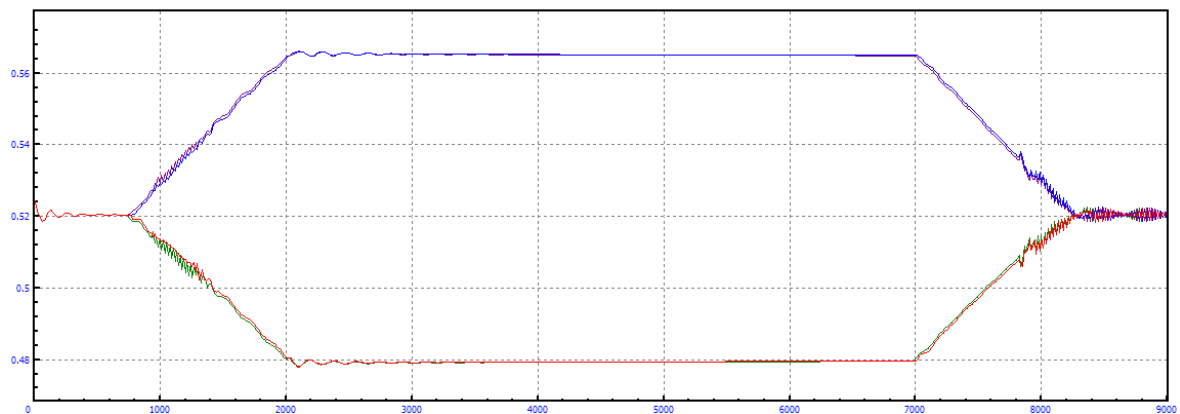


Figura A.560: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=135\text{m/s}$

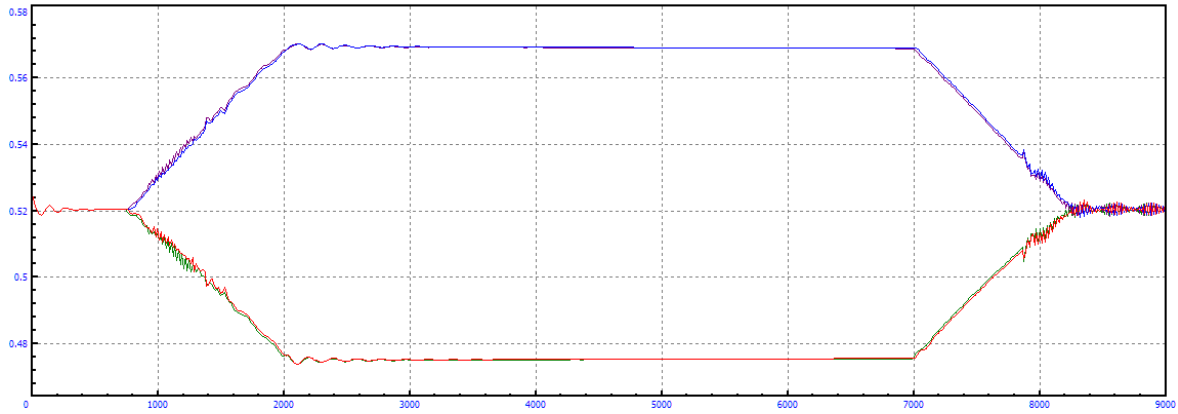


Figura A.561: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=140\text{m/s}$

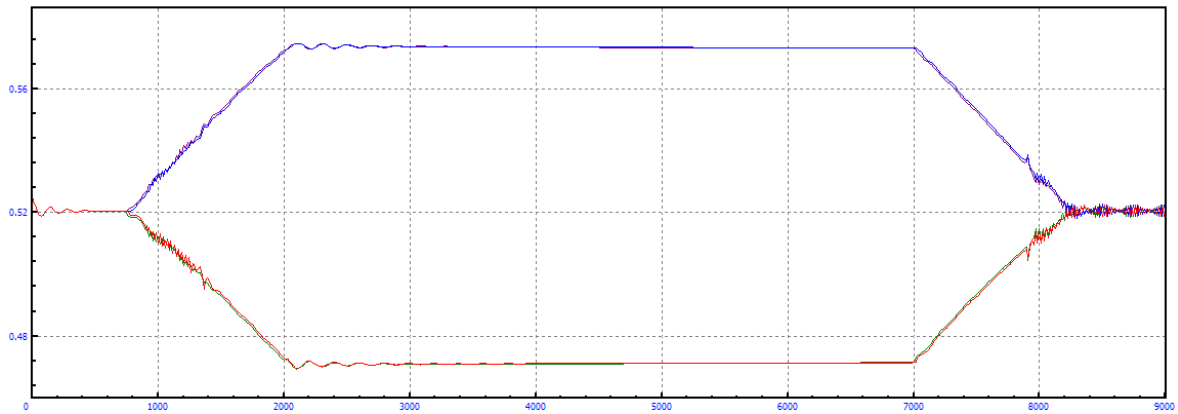


Figura A.562: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=145\text{m/s}$

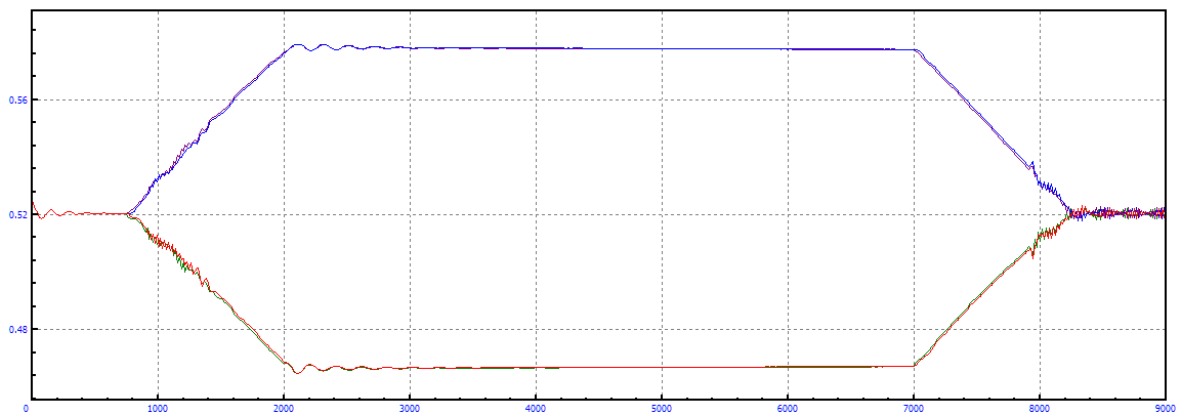


Figura A.563: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=150\text{m/s}$

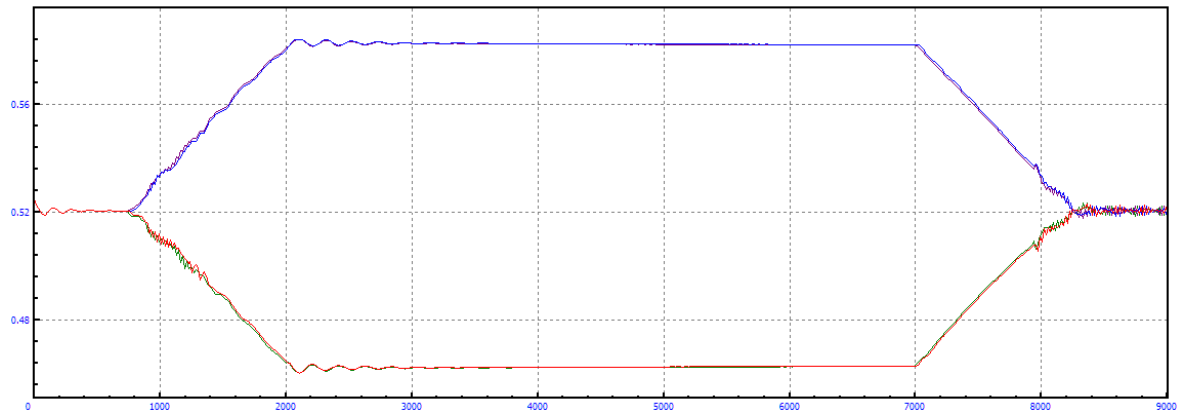


Figura A.564: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=155\text{m/s}$

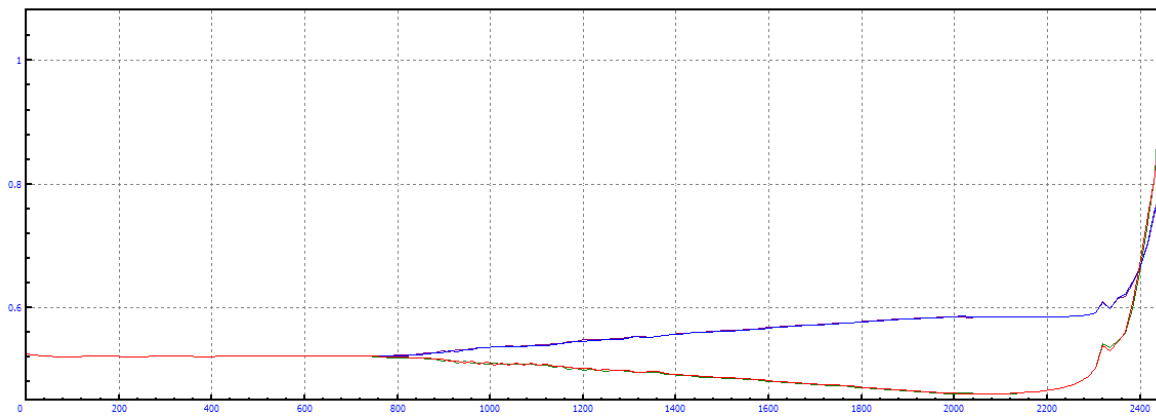


Figura A.565: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=0% y $V=160\text{m/s}$

B.3.6 MODIFICACIÓN=+20%

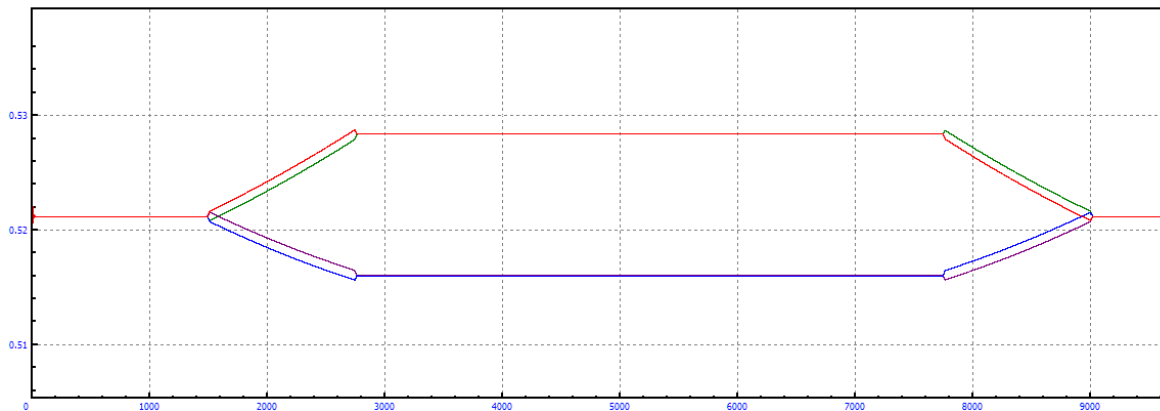


Figura A.566: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+20% y V=5m/s

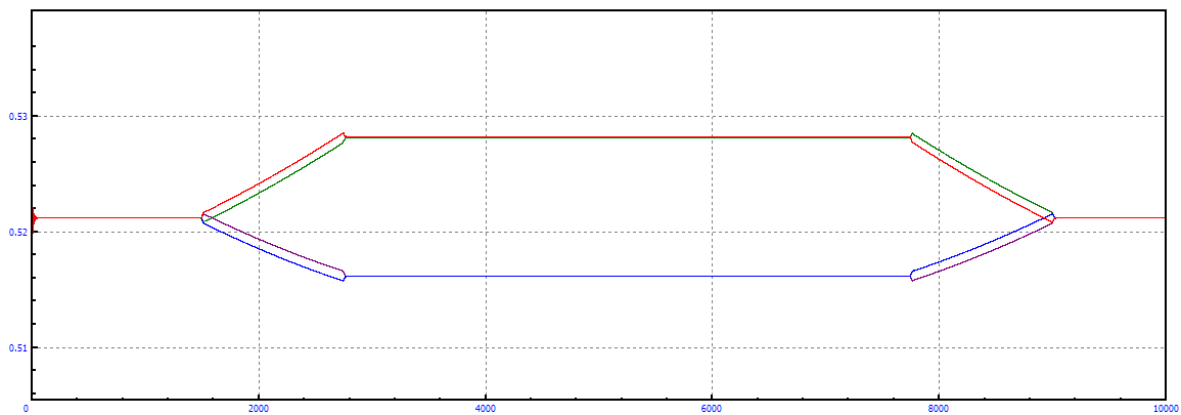


Figura A.567: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+20% y V=10m/s

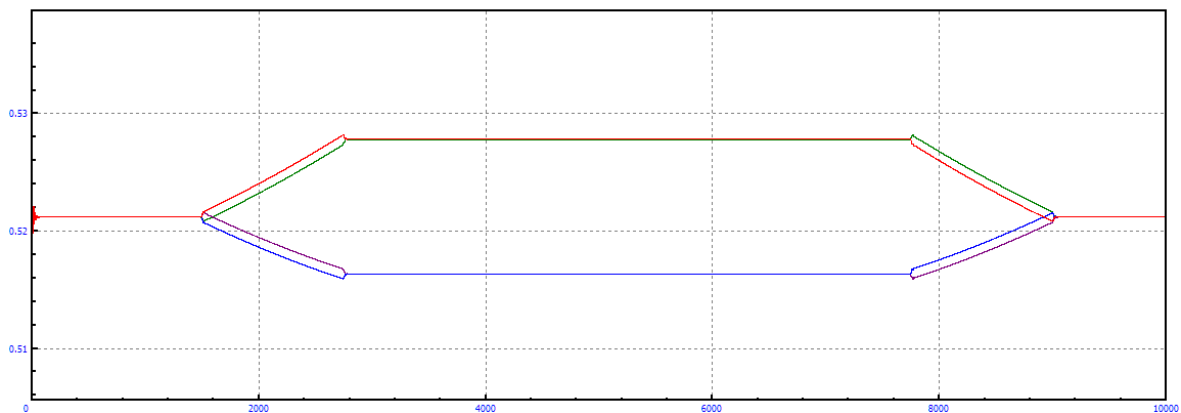


Figura A.568: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+20% y V=15m/s

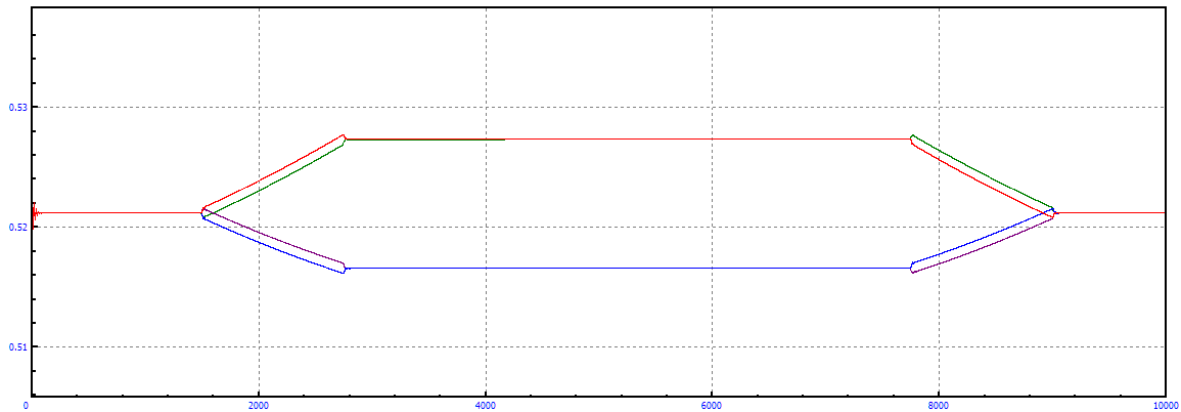


Figura A.569: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=20\text{m/s}$

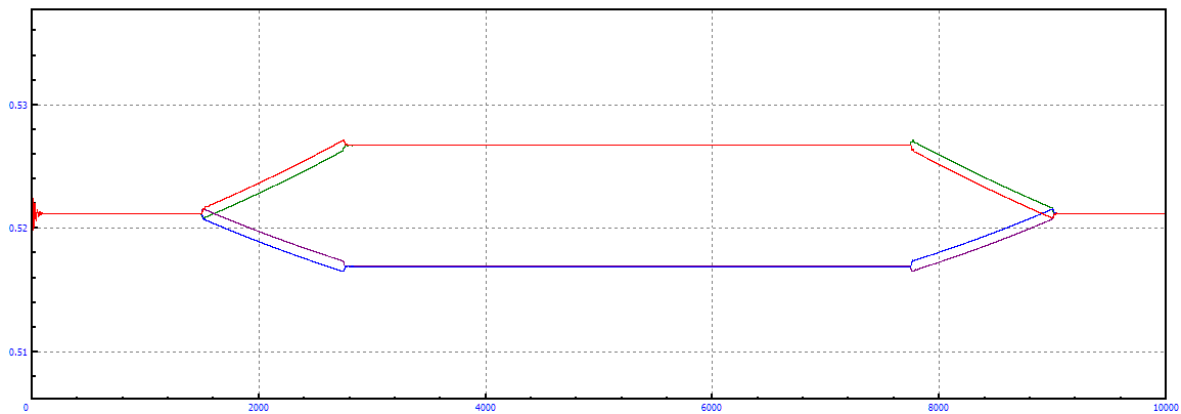


Figura A.570: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=25\text{m/s}$

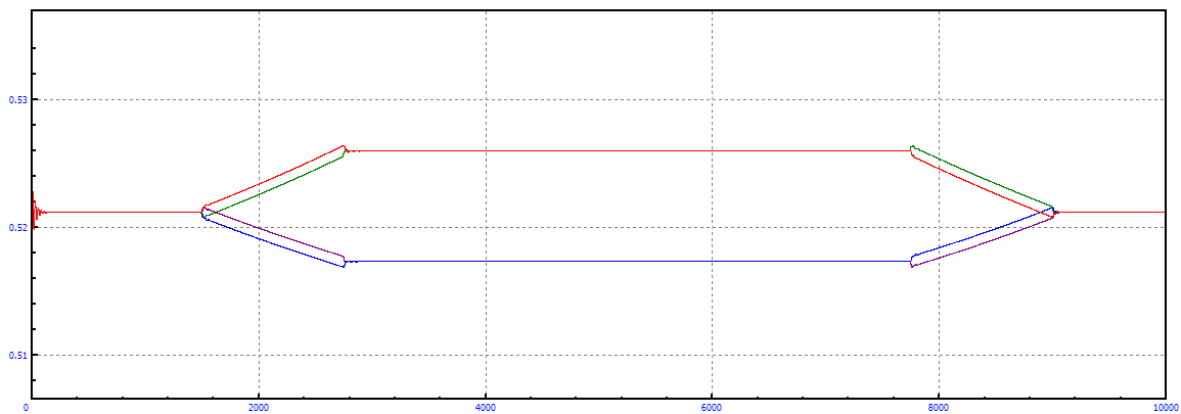


Figura A.571: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=30\text{m/s}$

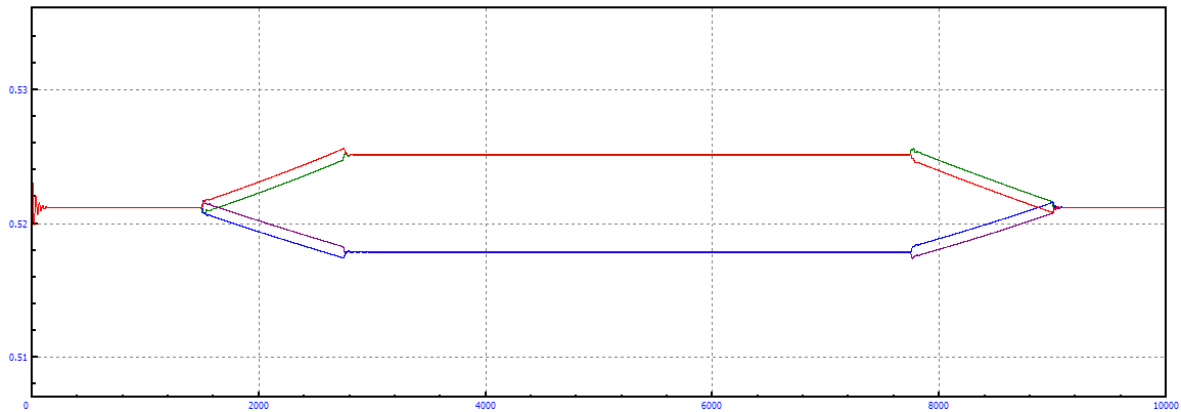


Figura A.572: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=35\text{m/s}$

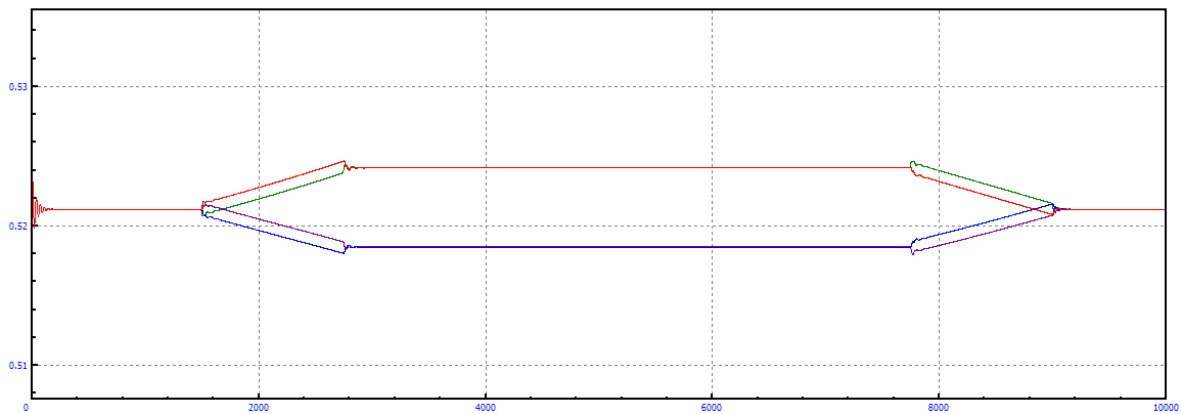


Figura A.573: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=40\text{m/s}$

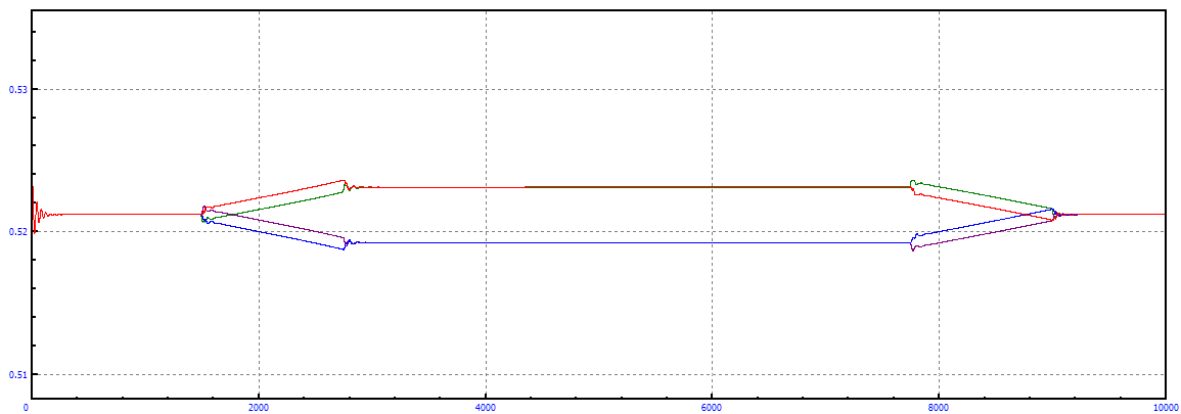


Figura A.574: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=45\text{m/s}$

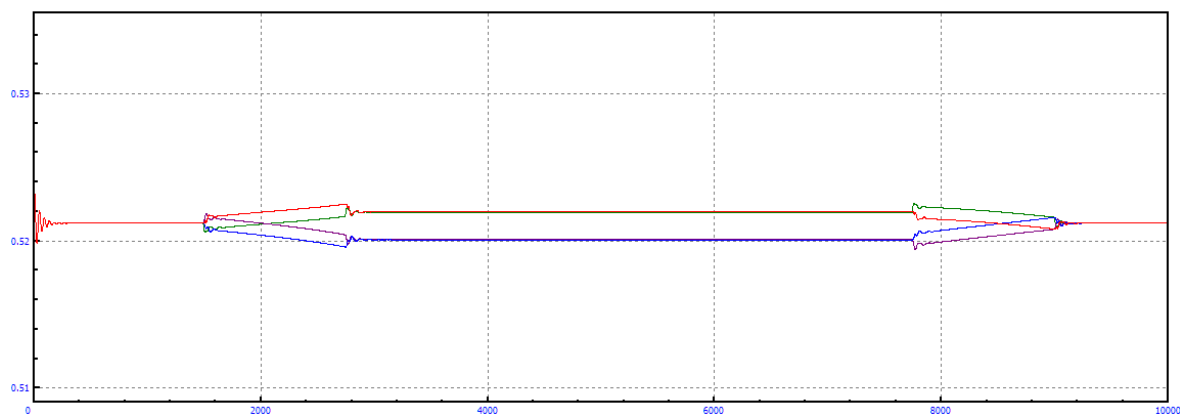


Figura A.575: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=50\text{m/s}$

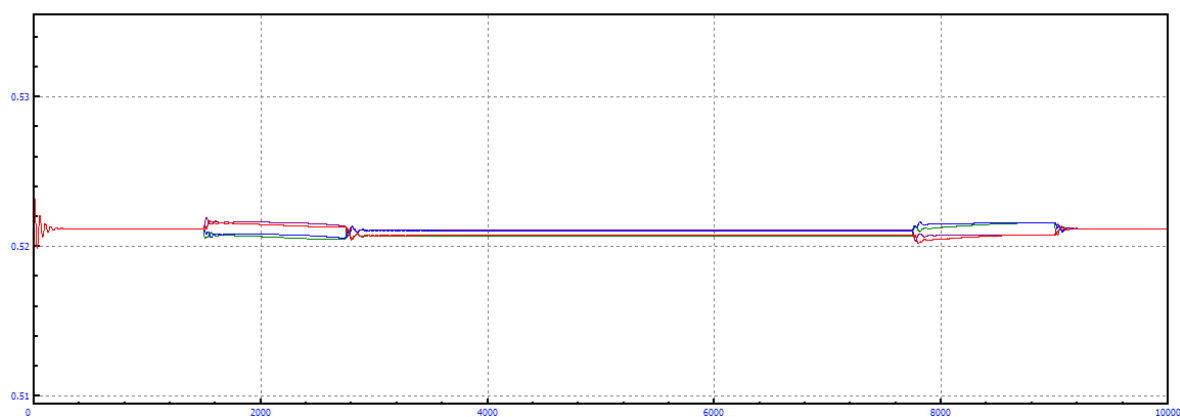


Figura A.576: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=55\text{m/s}$

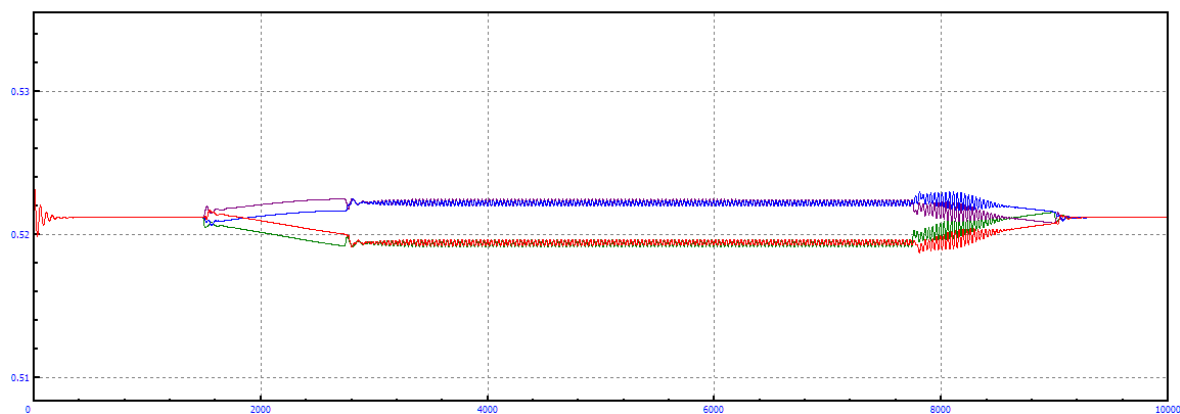


Figura A.577: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=60\text{m/s}$

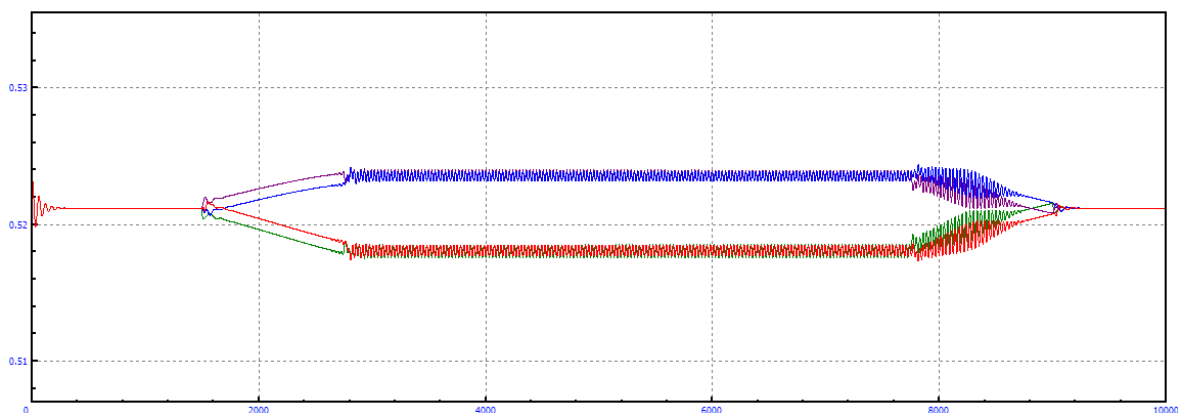


Figura A.578: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+20% y V=65m/s

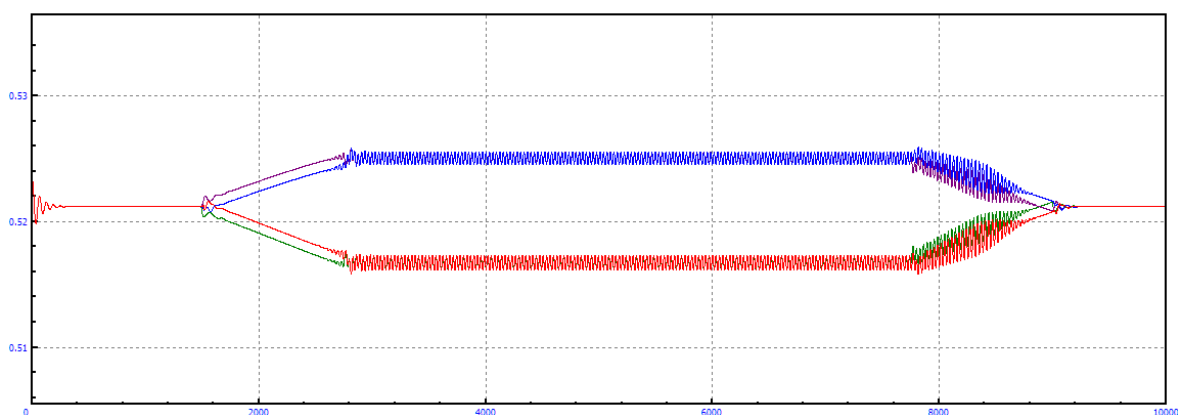


Figura A.579: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+20% y V=70m/s

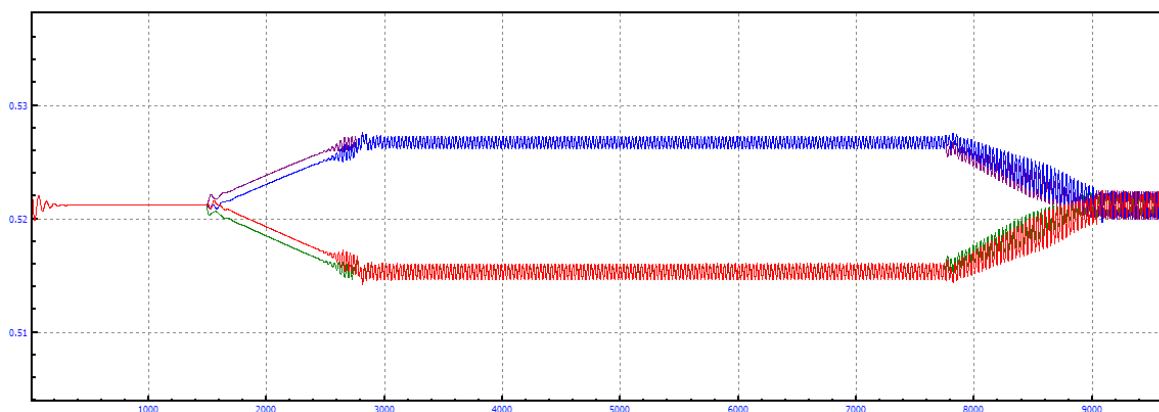


Figura A.580: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+20% y V=75m/s

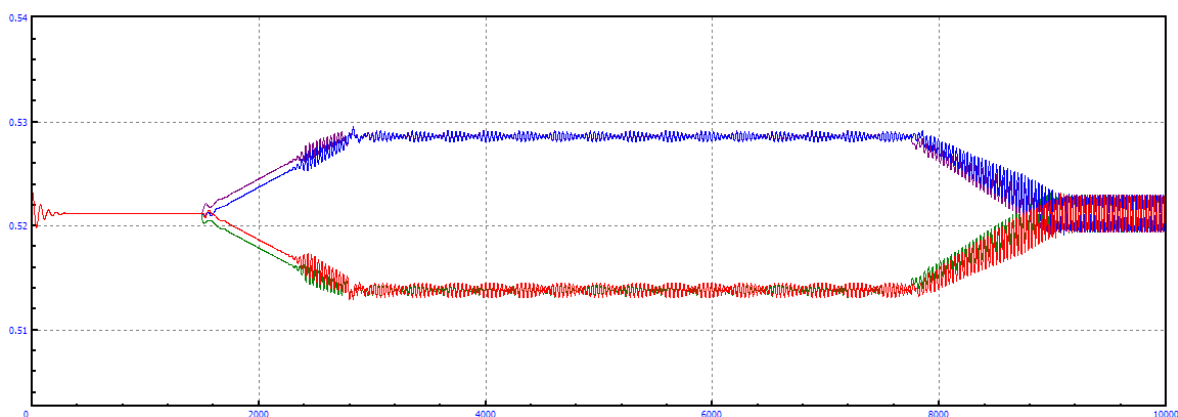


Figura A.581: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=80\text{m/s}$

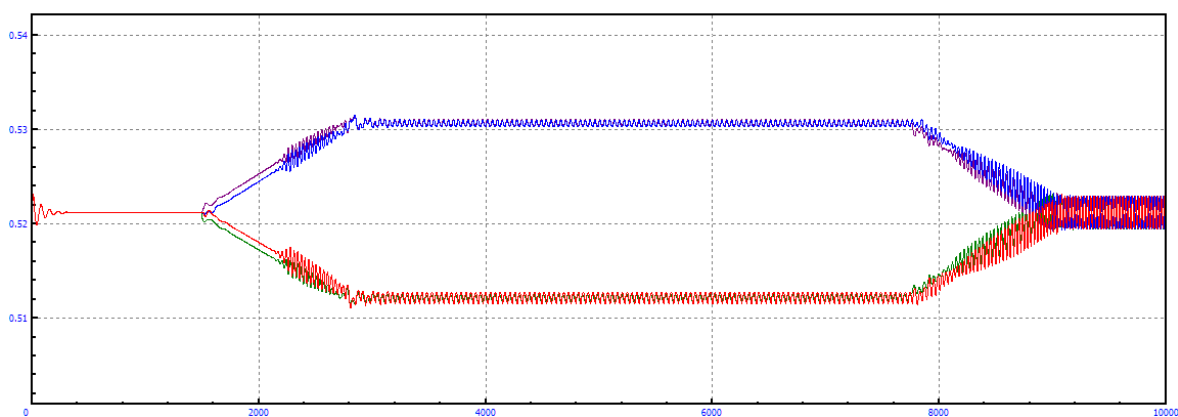


Figura A.582: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=85\text{m/s}$

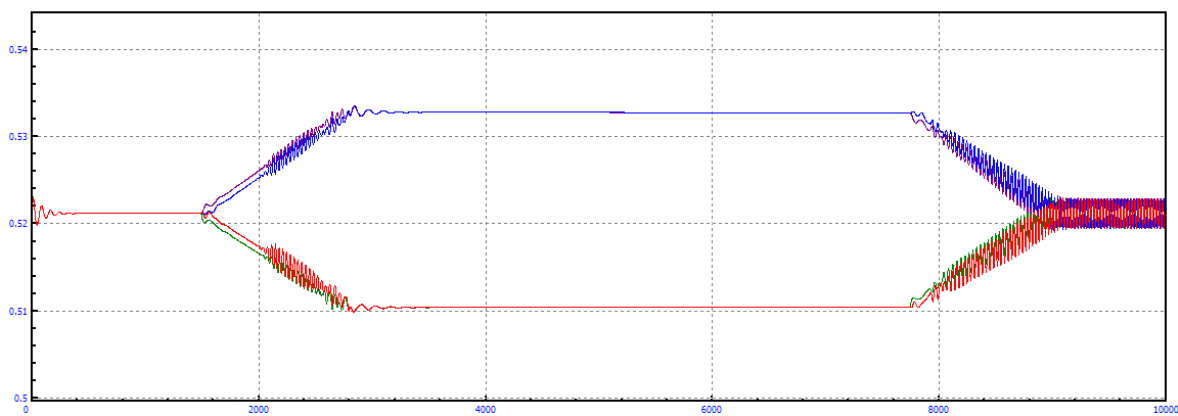


Figura A.583: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=90\text{m/s}$

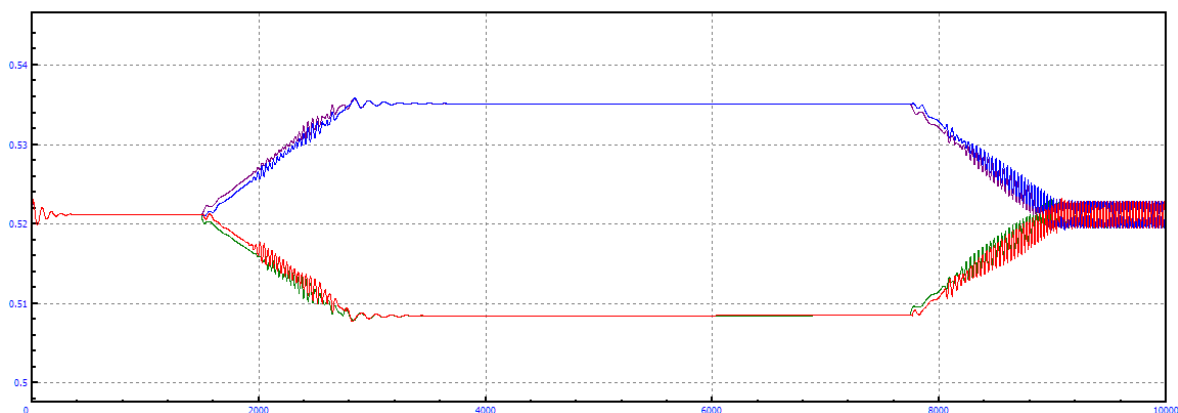


Figura A.584: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=95\text{m/s}$

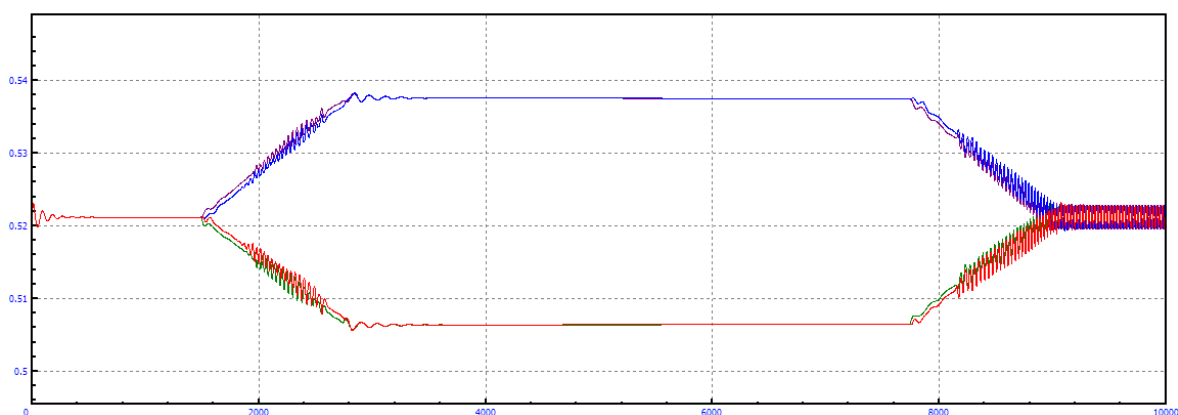


Figura A.585: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=100\text{m/s}$

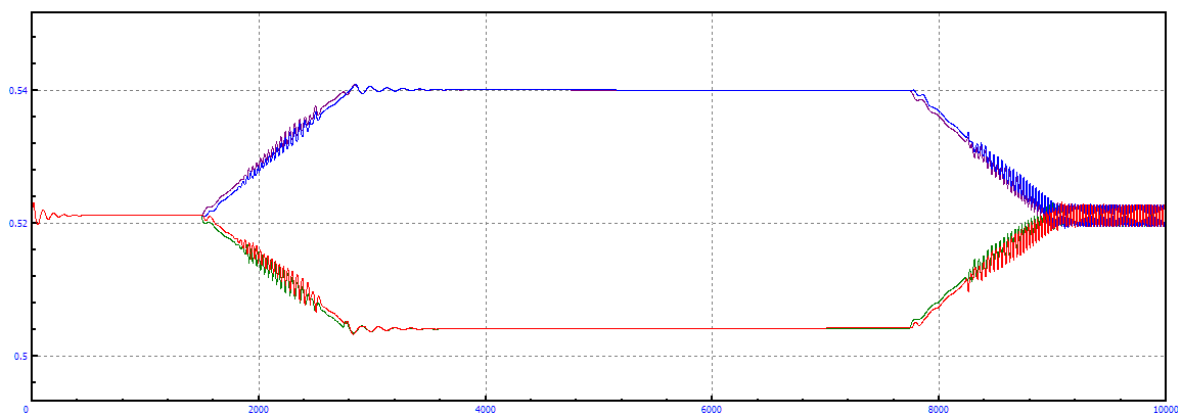


Figura A.586: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+20\%$ y $V=105\text{m/s}$

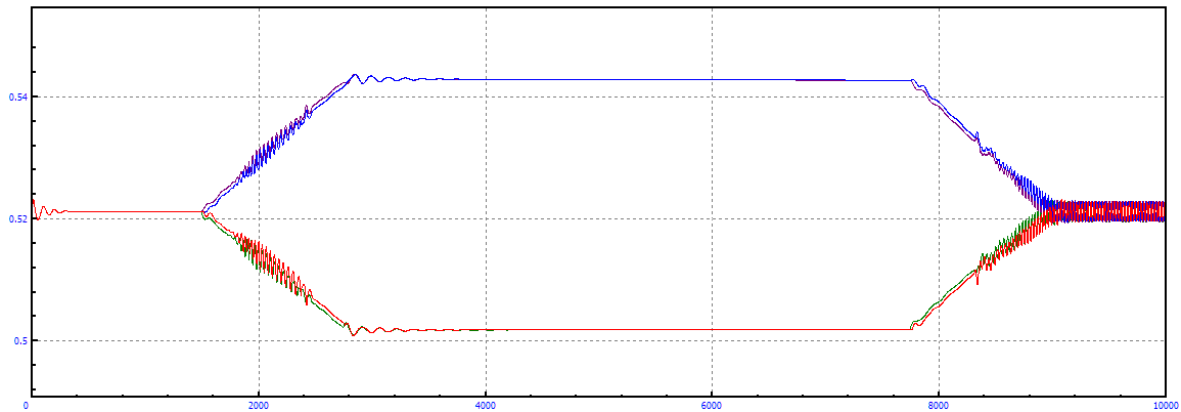


Figura A.587: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=110\text{m/s}$

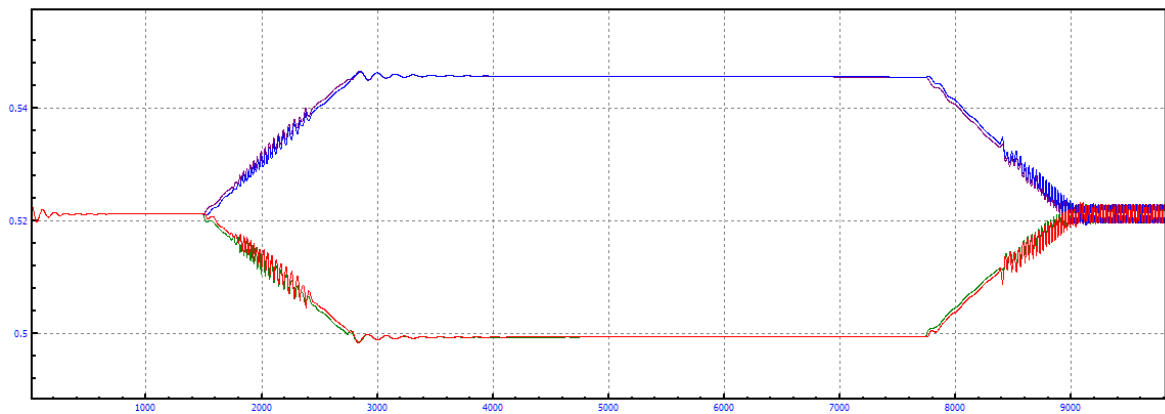


Figura A.588: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=115\text{m/s}$

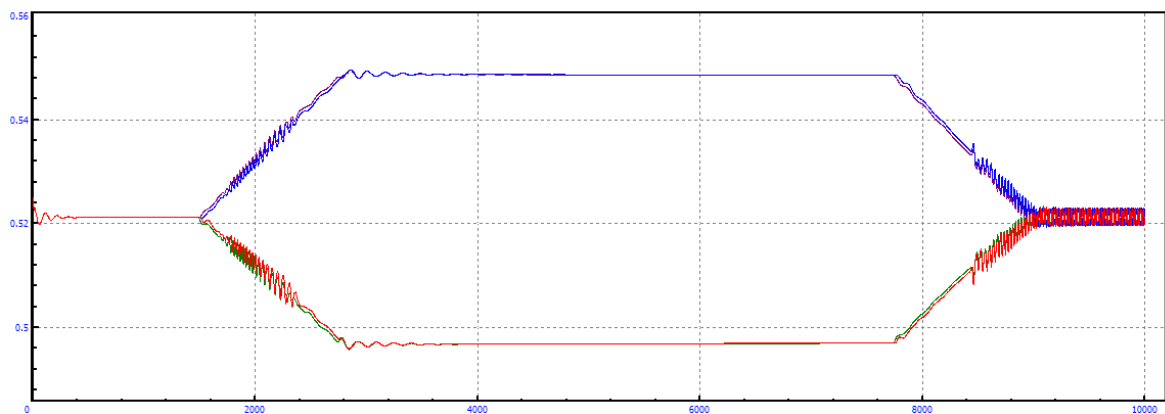


Figura A.589: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=120\text{m/s}$

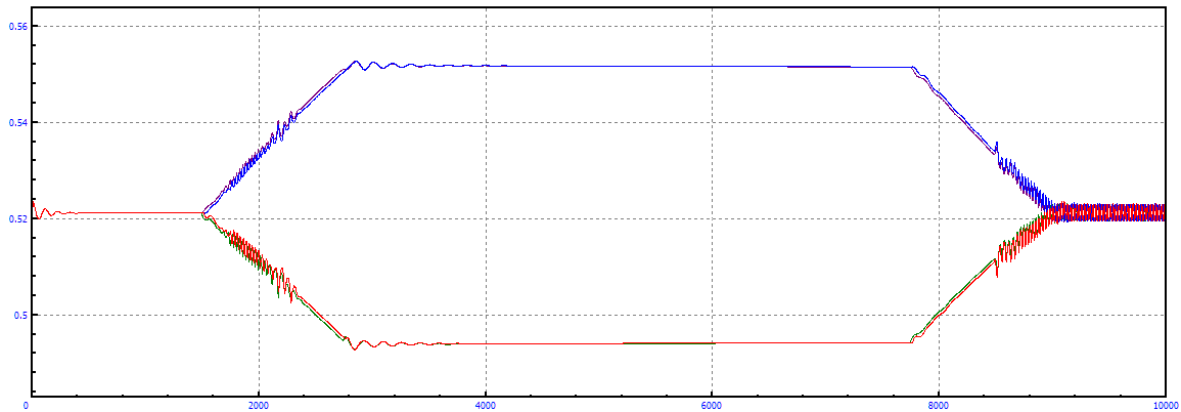


Figura A.590: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=125\text{m/s}$

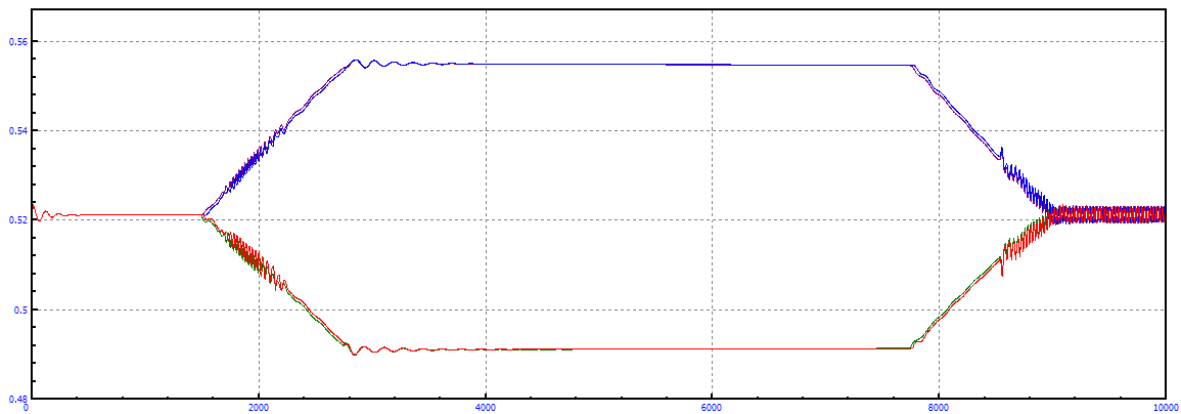


Figura A.591: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=130\text{m/s}$

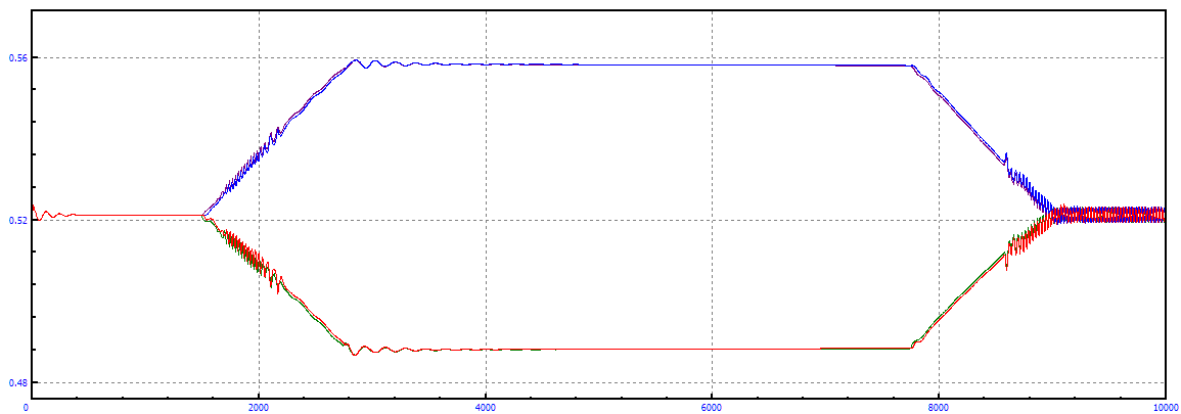


Figura A.592: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=135\text{m/s}$

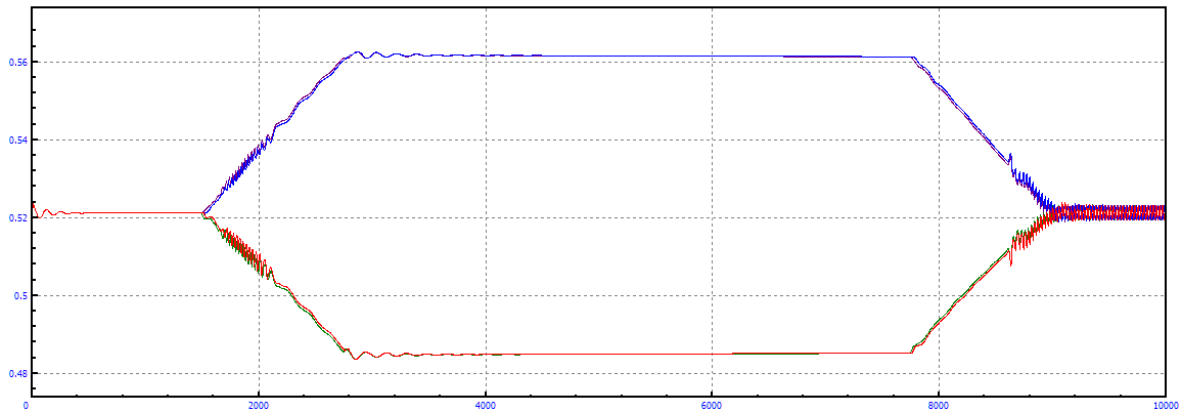


Figura A.593: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=140\text{m/s}$

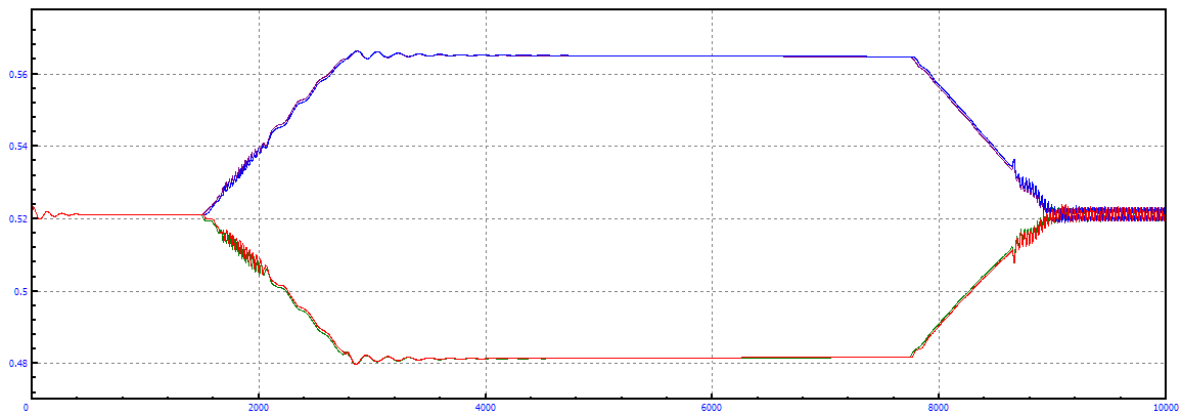


Figura A.594: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=145\text{m/s}$

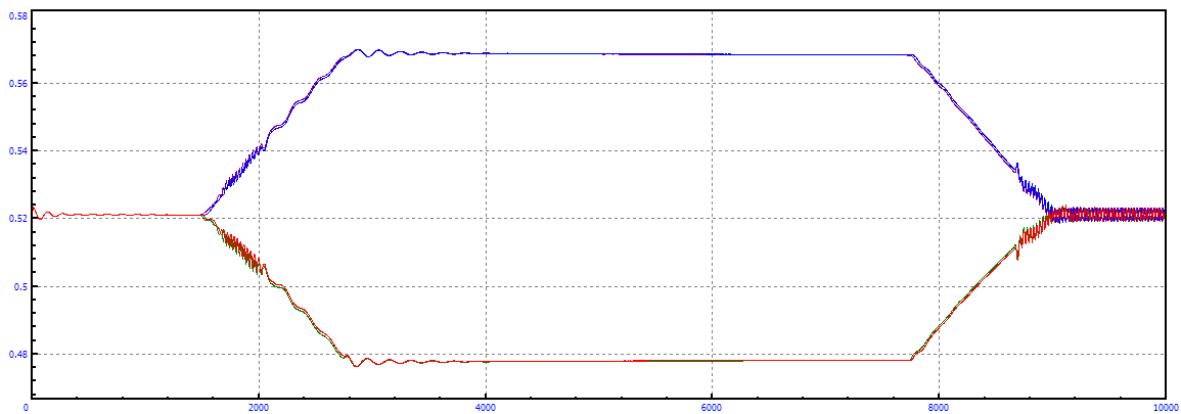


Figura A.595: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=150\text{m/s}$

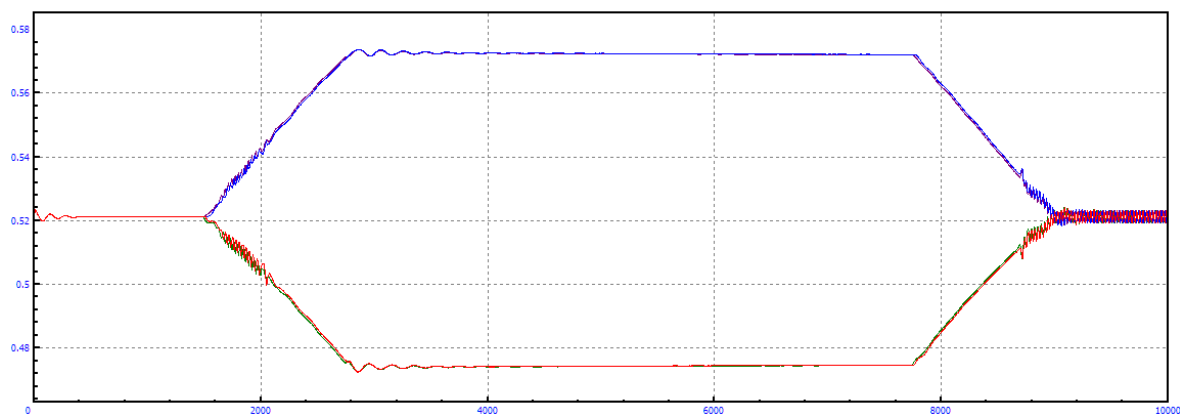


Figura A.596: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=155\text{m/s}$

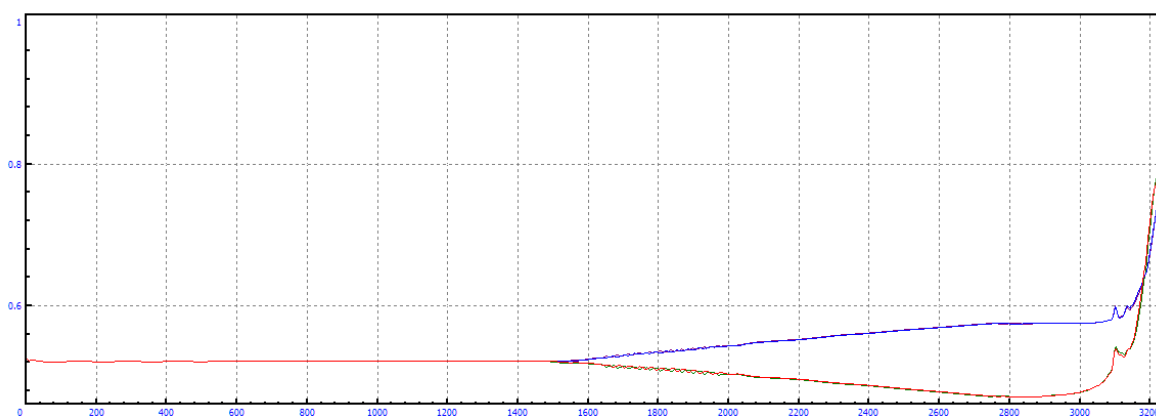


Figura A.597: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+20% y $V=160\text{m/s}$

B.3.7 MODIFICACIÓN=+40%

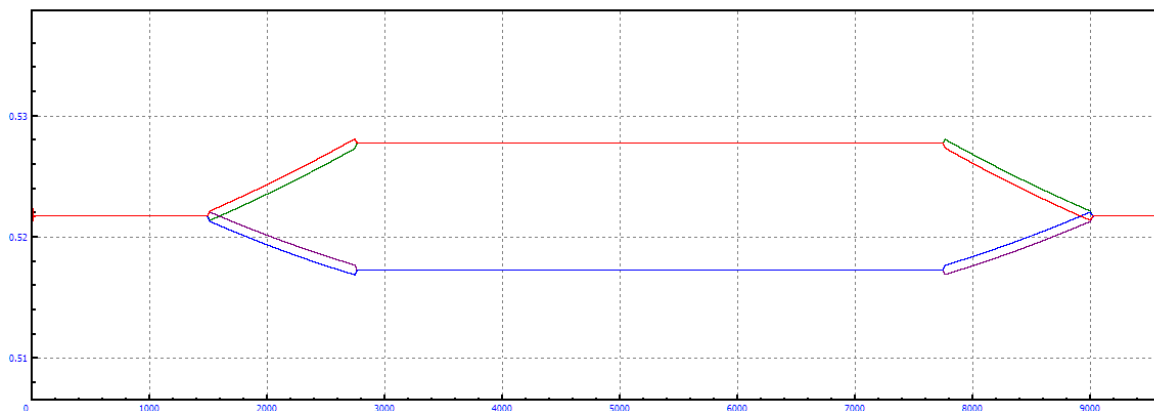


Figura A.598: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+40% y V=5m/s

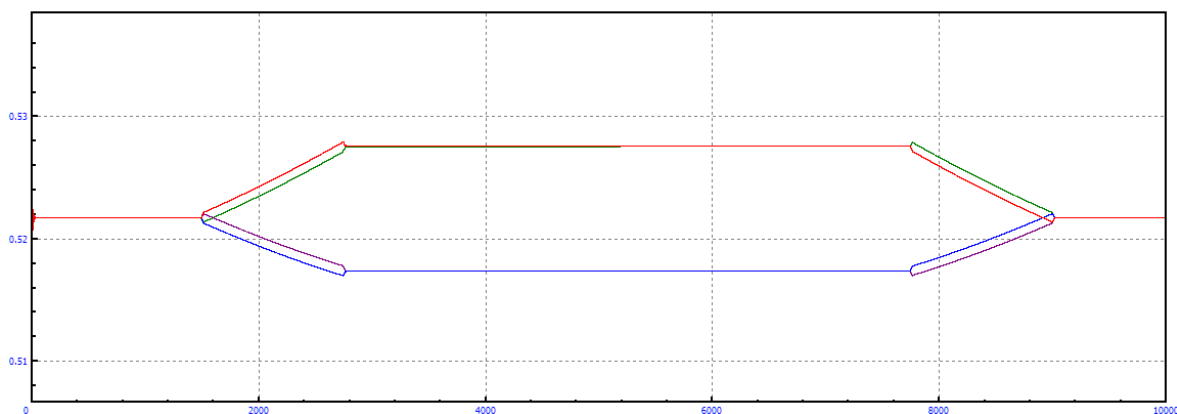


Figura A.599: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+40% y V=10m/s

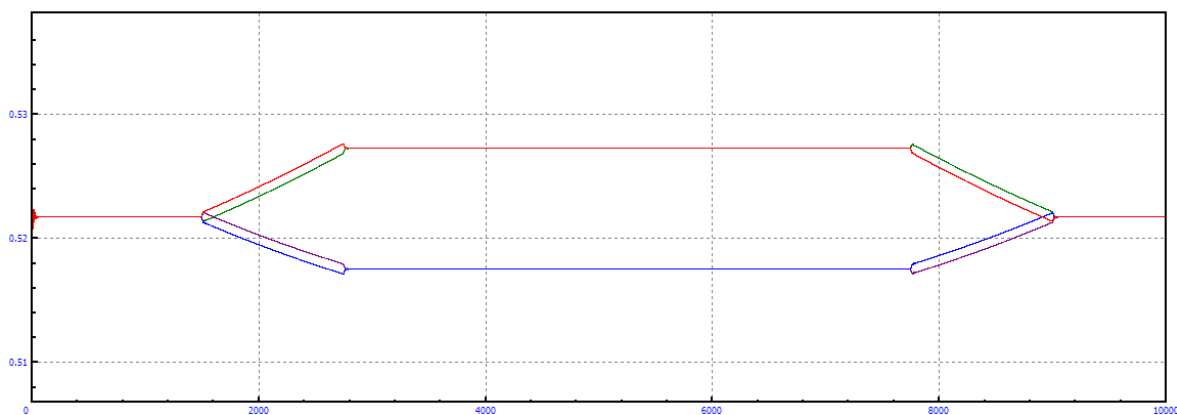


Figura A.600: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+40% y V=15m/s

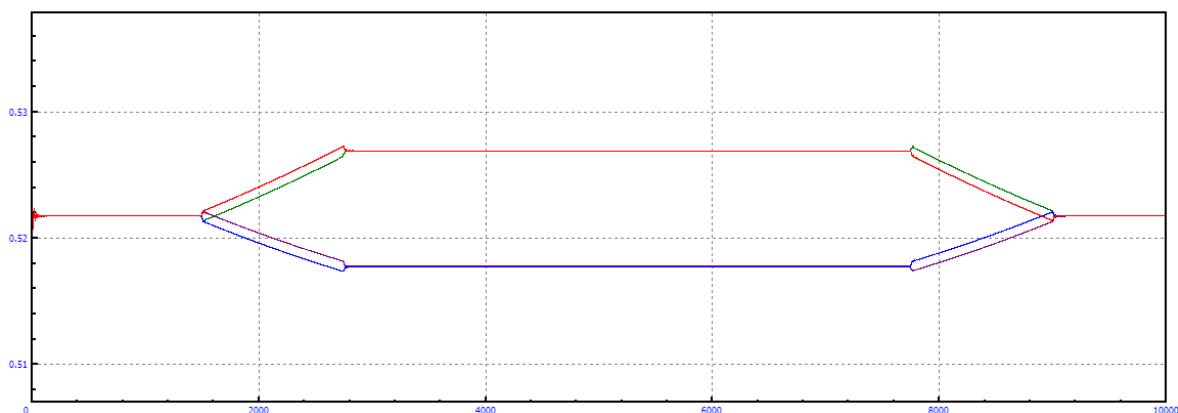


Figura A.601: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+40% y V=20m/s

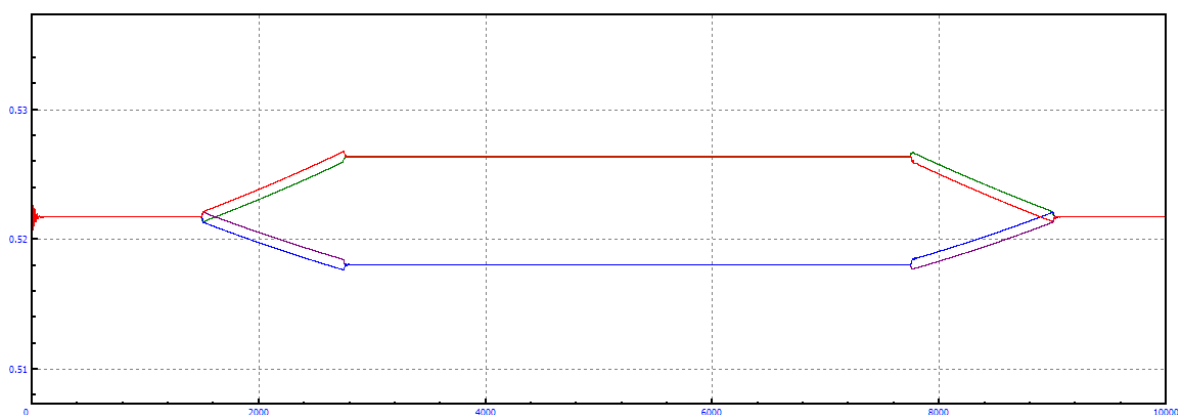


Figura A.602: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+40% y V=25m/s

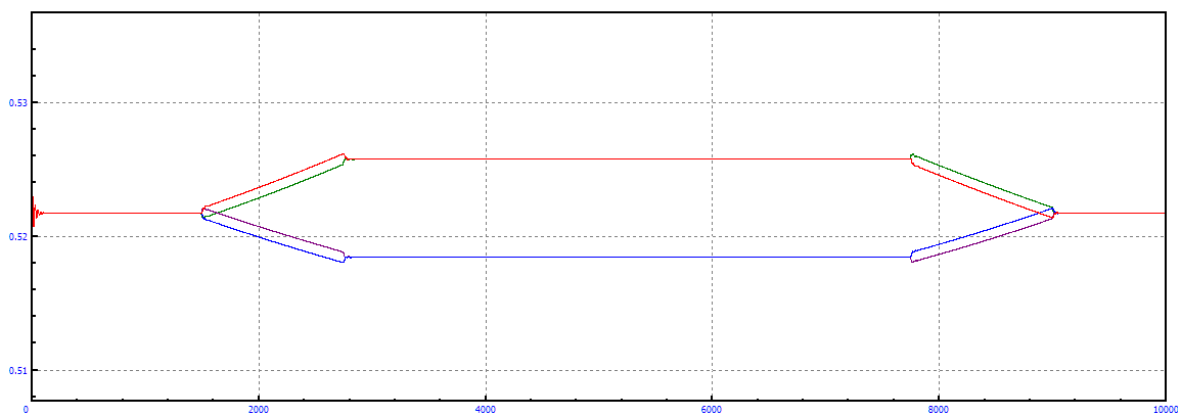


Figura A.603: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+40% y V=30m/s

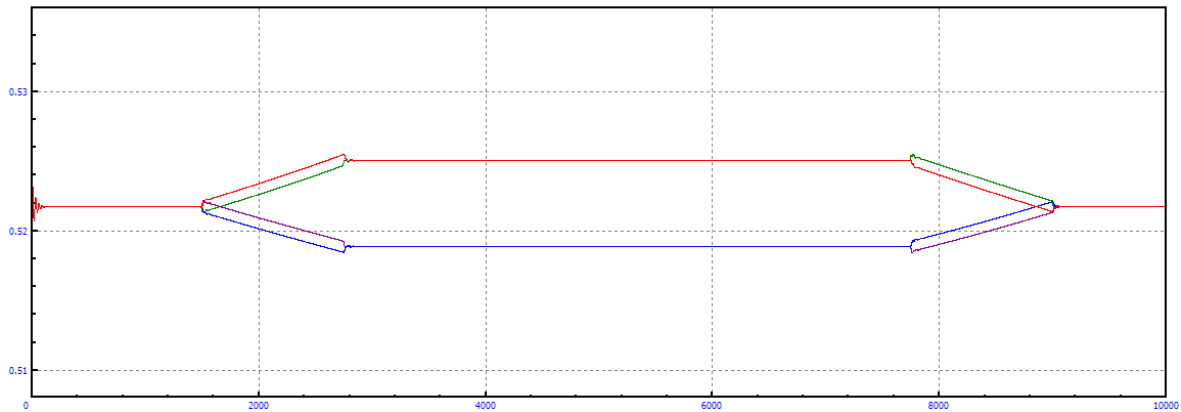


Figura A.604: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=35\text{m/s}$

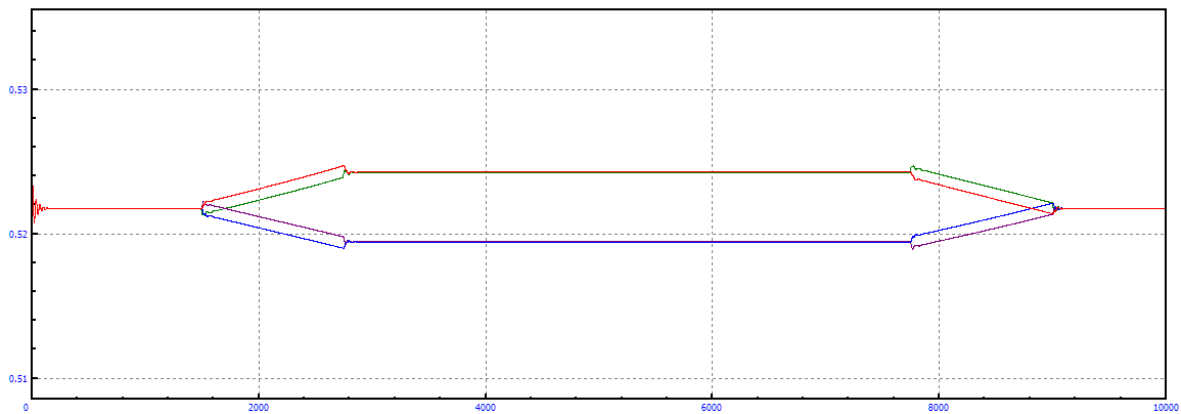


Figura A.605: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=40\text{m/s}$

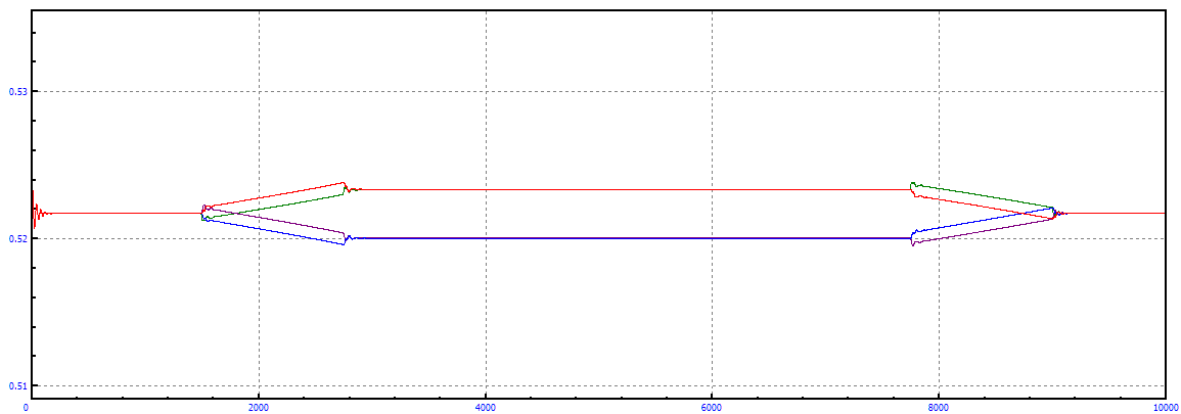


Figura A.606: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=45\text{m/s}$

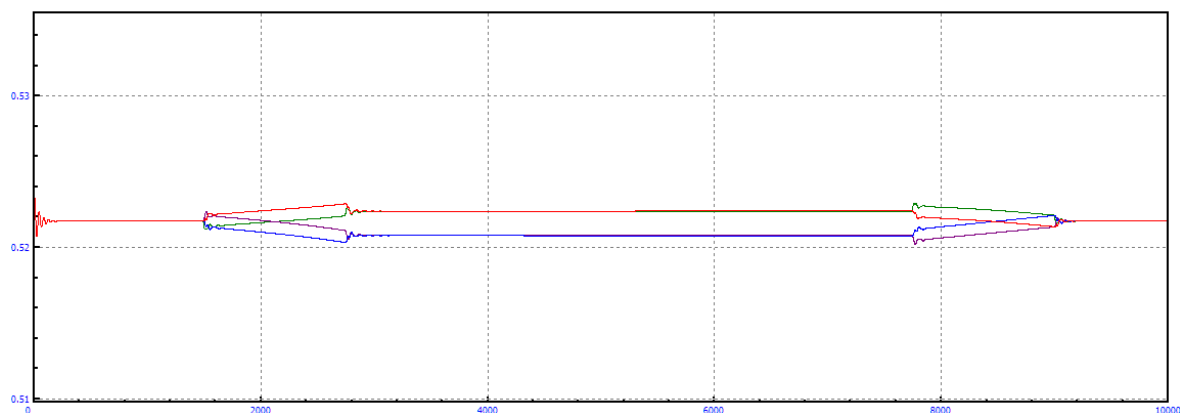


Figura A.607: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=50\text{m/s}$

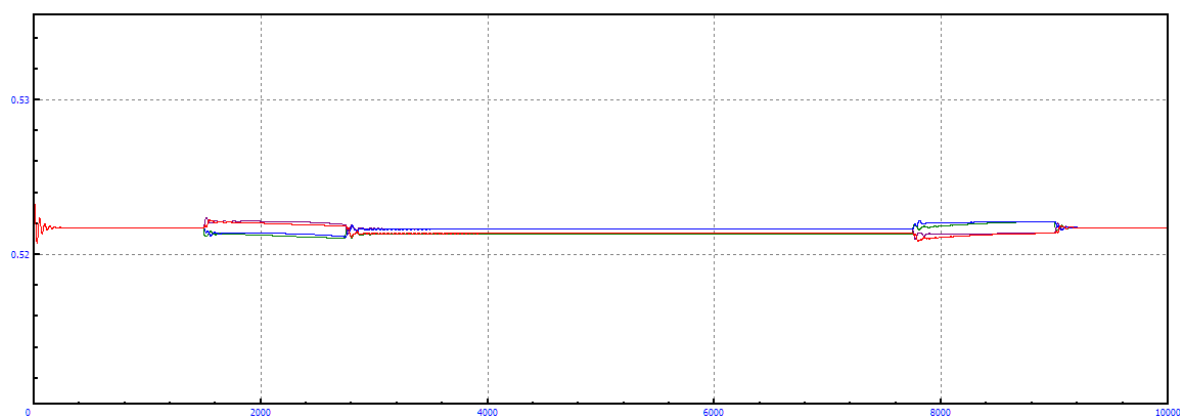


Figura A.608: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=55\text{m/s}$

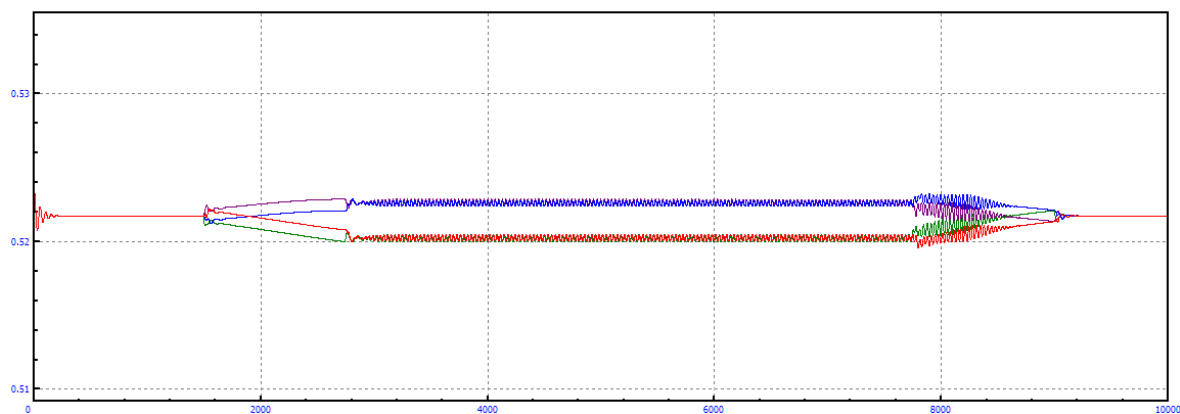


Figura A.609: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=60\text{m/s}$

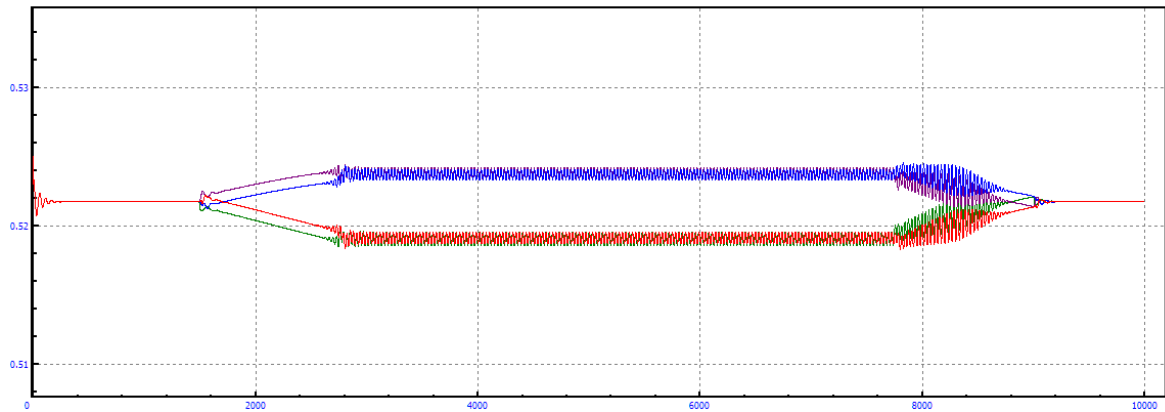


Figura A.610: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+40% y V=65m/s

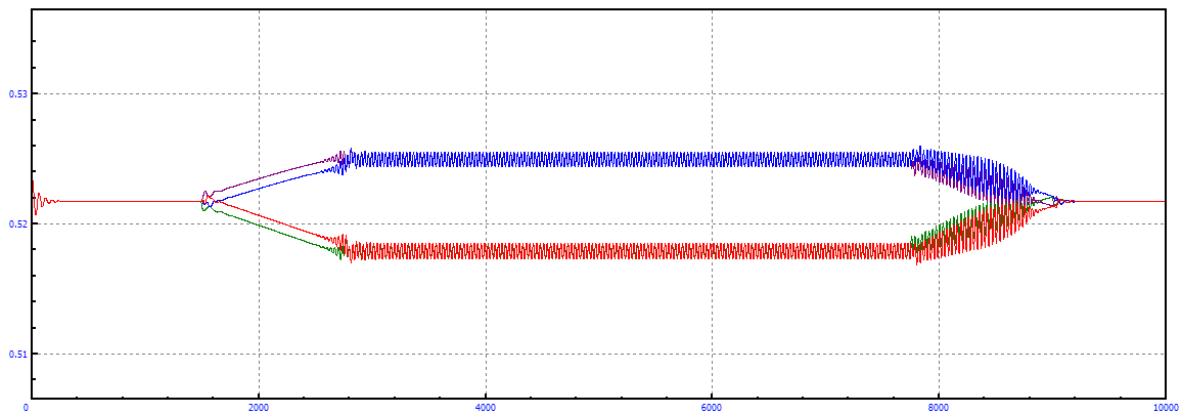


Figura A.611: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+40% y V=70m/s

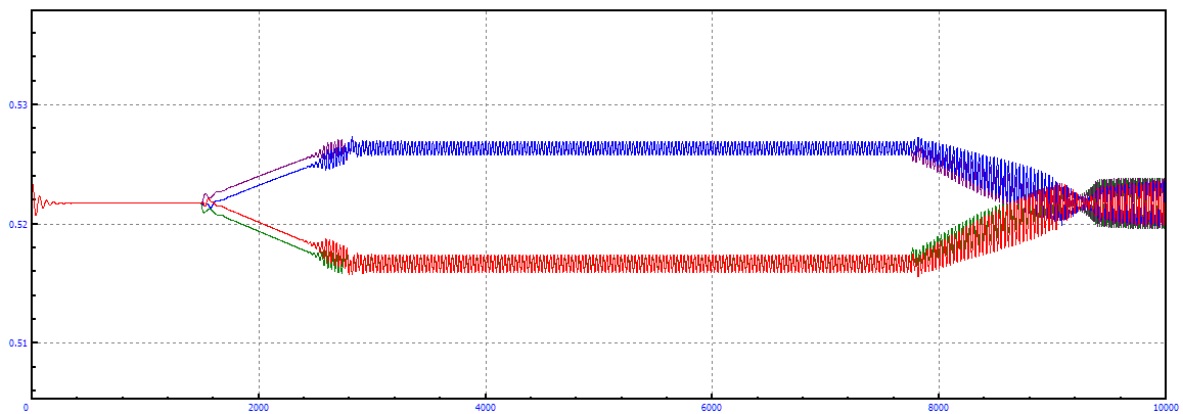


Figura A.612: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+40% y V=75m/s

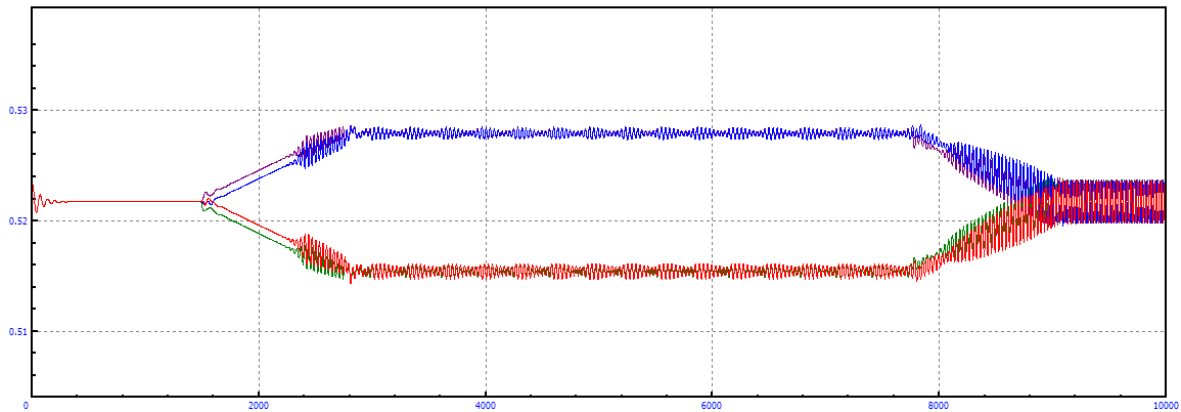


Figura A.613: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=80\text{m/s}$

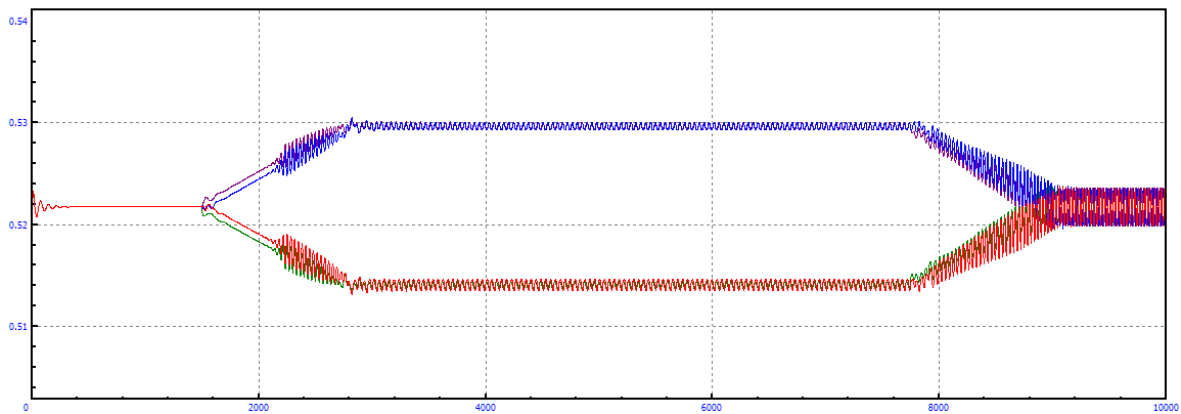


Figura A.614: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=85\text{m/s}$

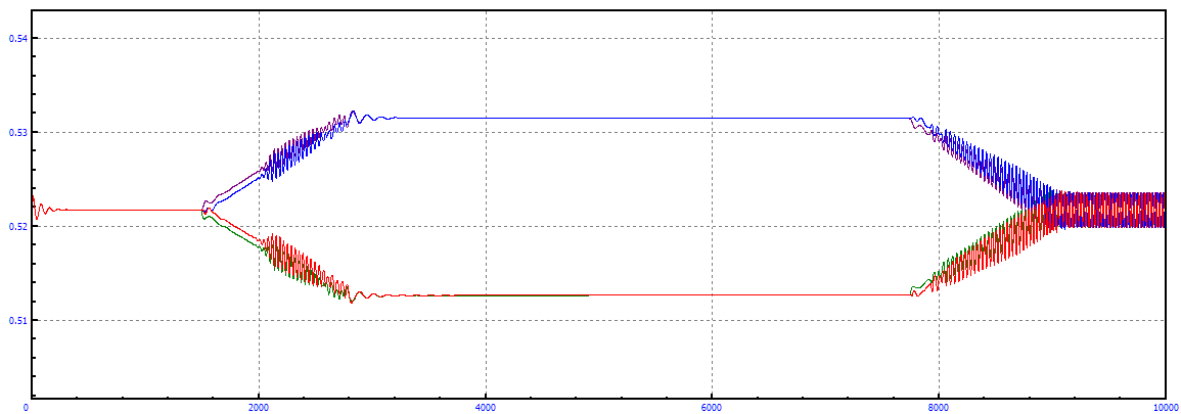


Figura A.615: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=90\text{m/s}$

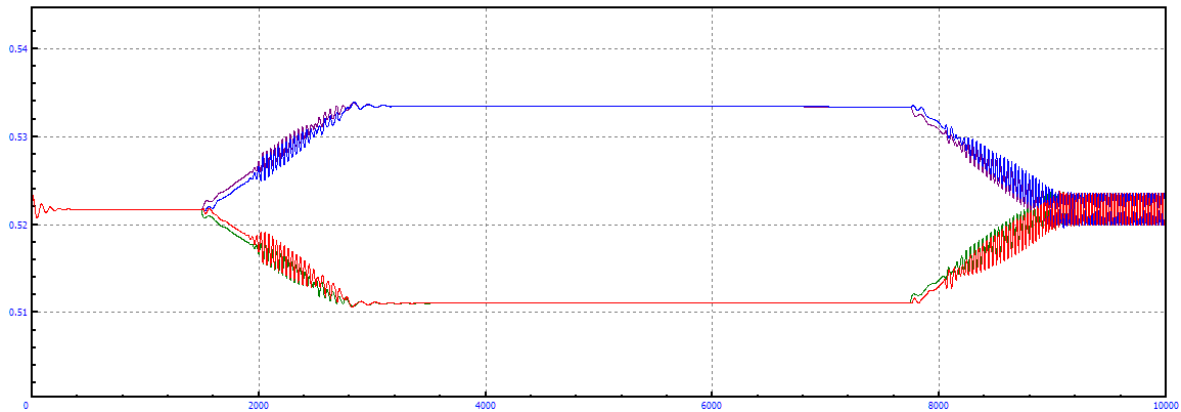


Figura A.616: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=95\text{m/s}$

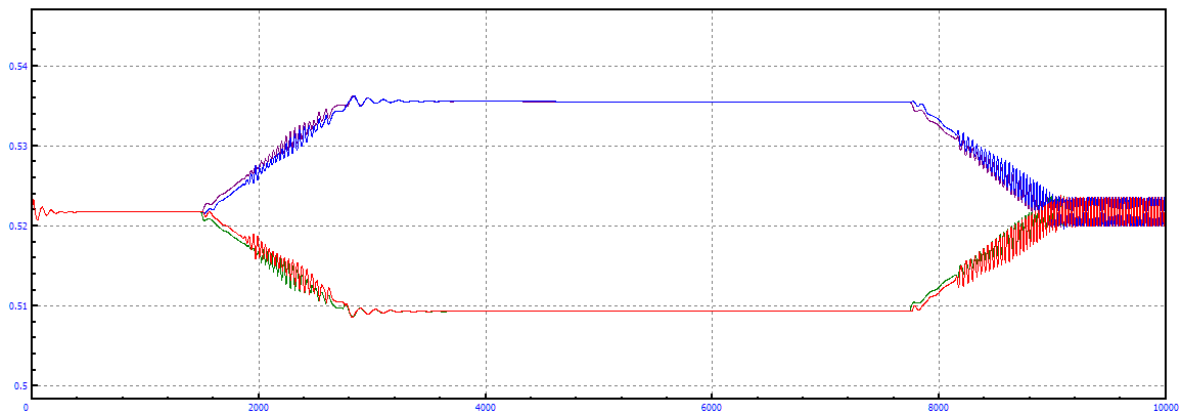


Figura A.617: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=100\text{m/s}$

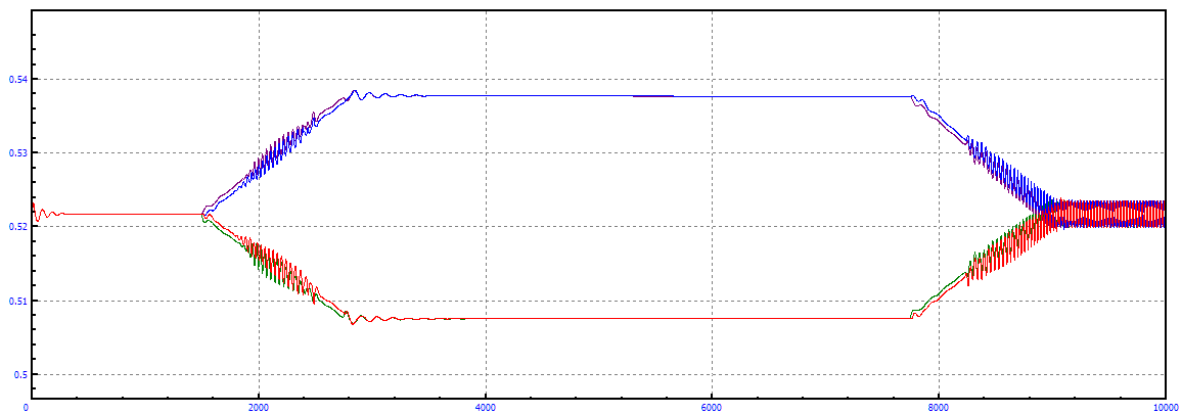


Figura A.618: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=105\text{m/s}$

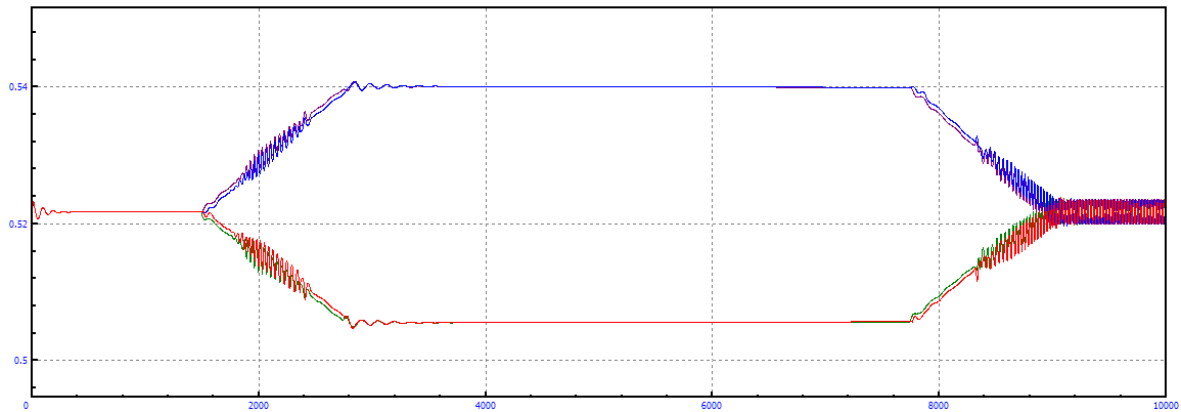


Figura A.619: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=110\text{m/s}$

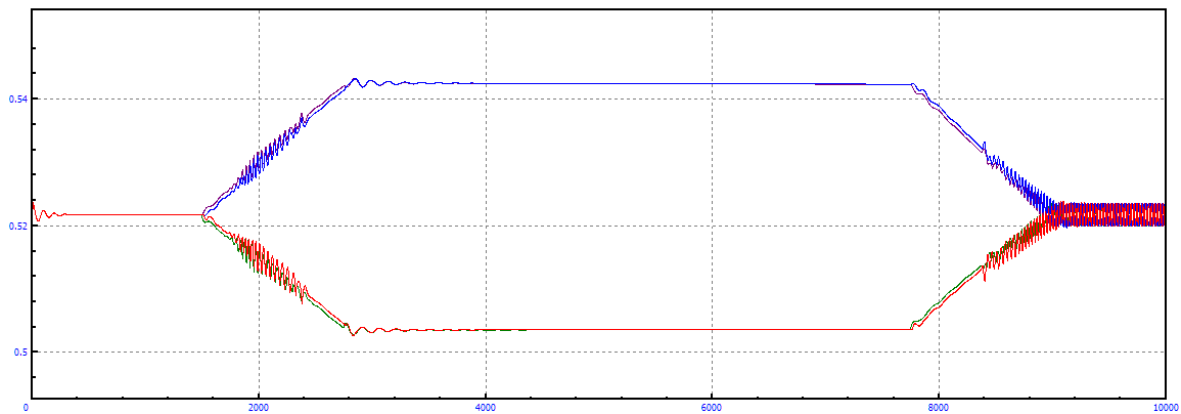


Figura A.620: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=115\text{m/s}$

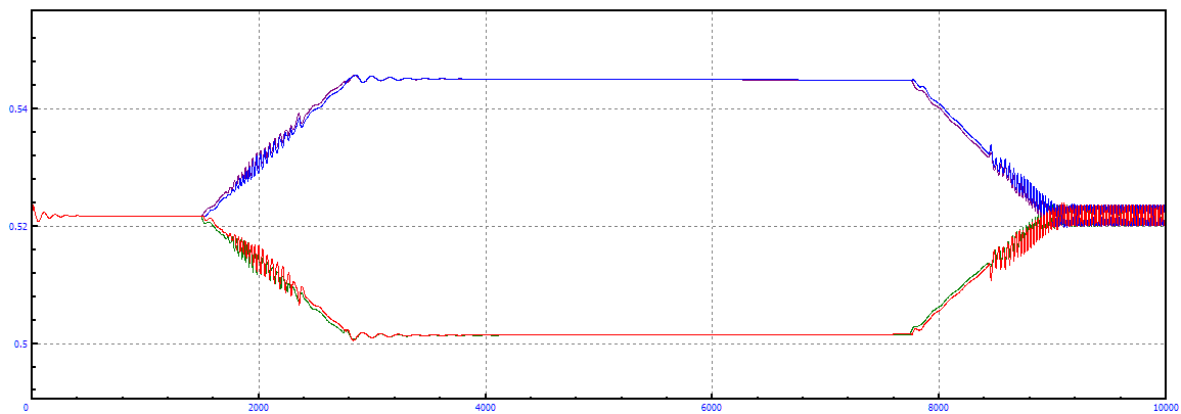


Figura A.621: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=120\text{m/s}$

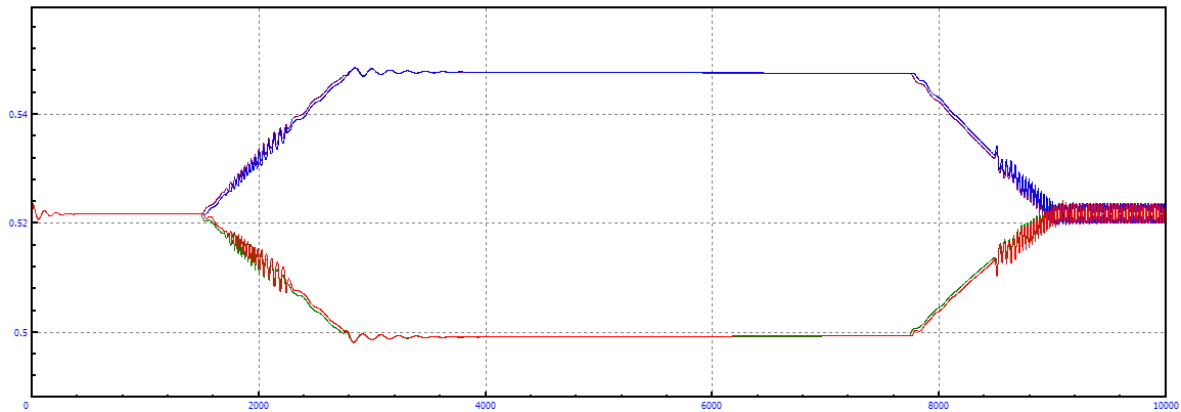


Figura A.622: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=125\text{m/s}$

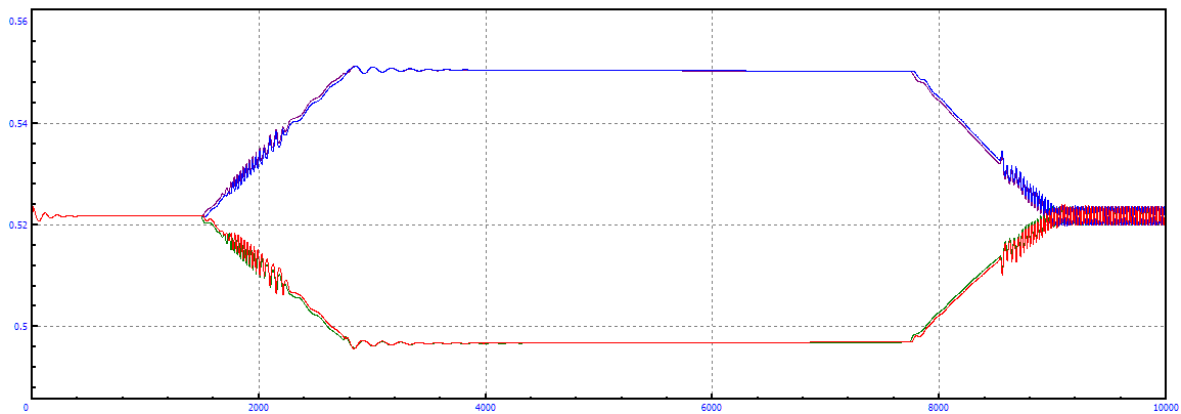


Figura A.623: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=130\text{m/s}$

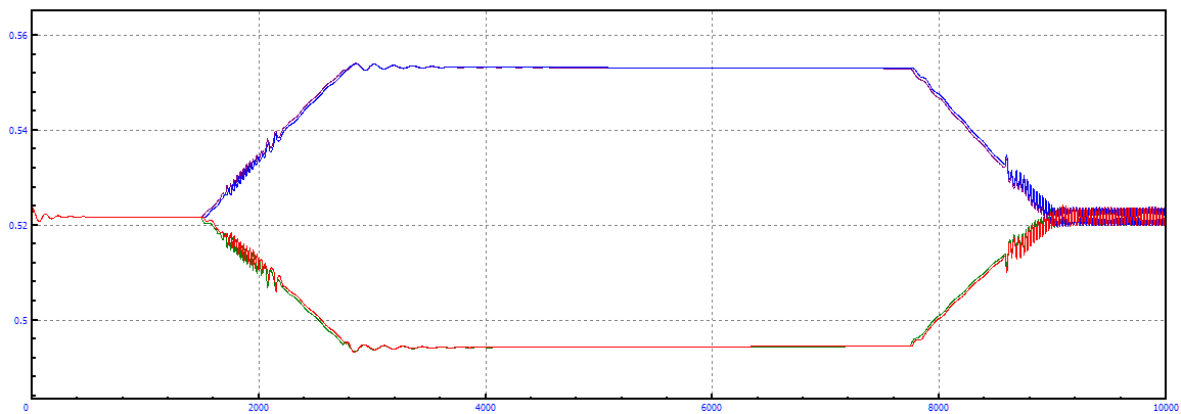


Figura A.624: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=135\text{m/s}$

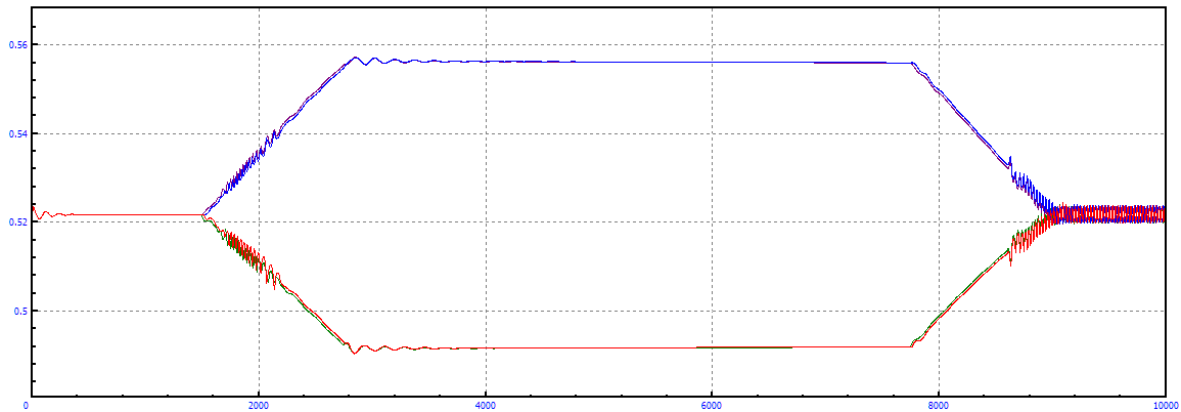


Figura A.625: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=140\text{m/s}$

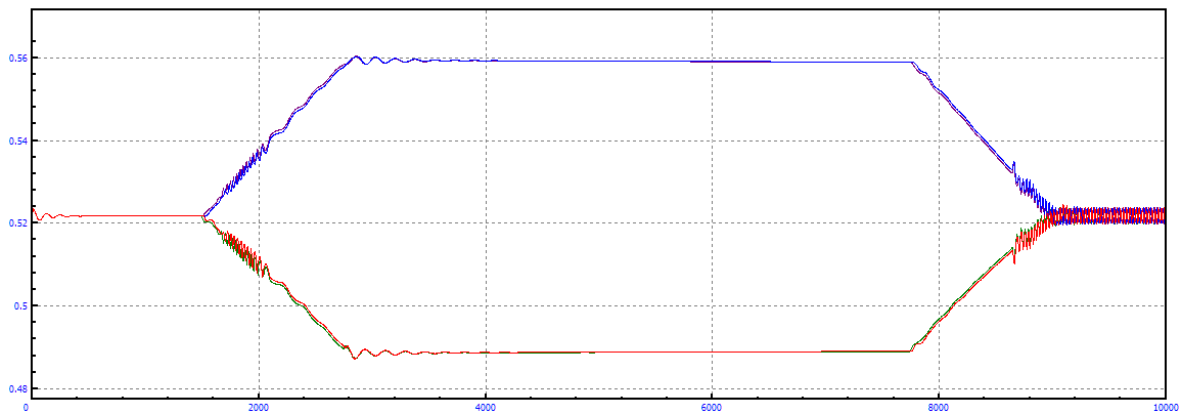


Figura A.626: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=145\text{m/s}$

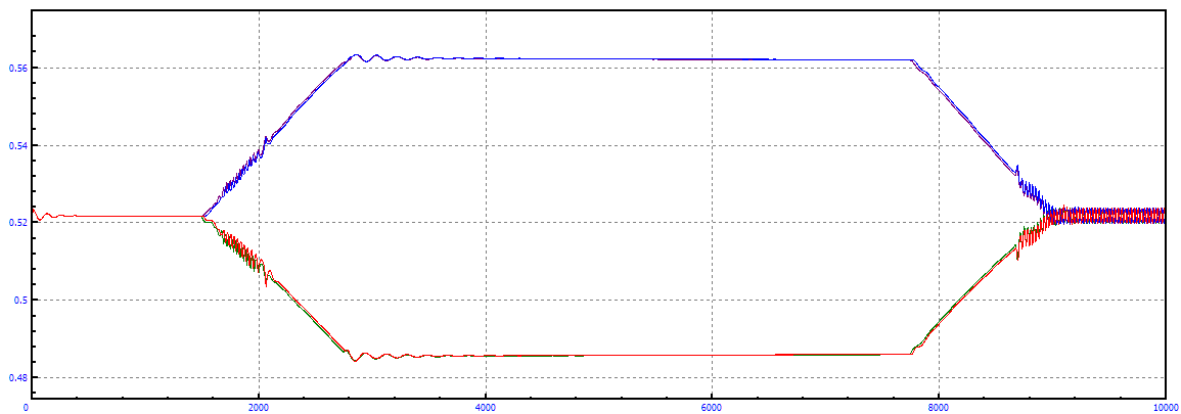


Figura A.627: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+40% y $V=150\text{m/s}$

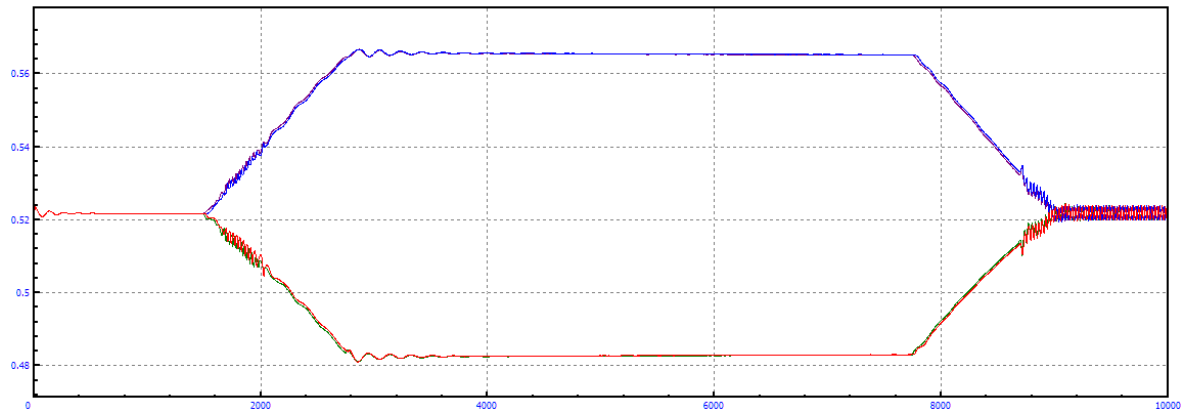


Figura A.628: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=155\text{m/s}$

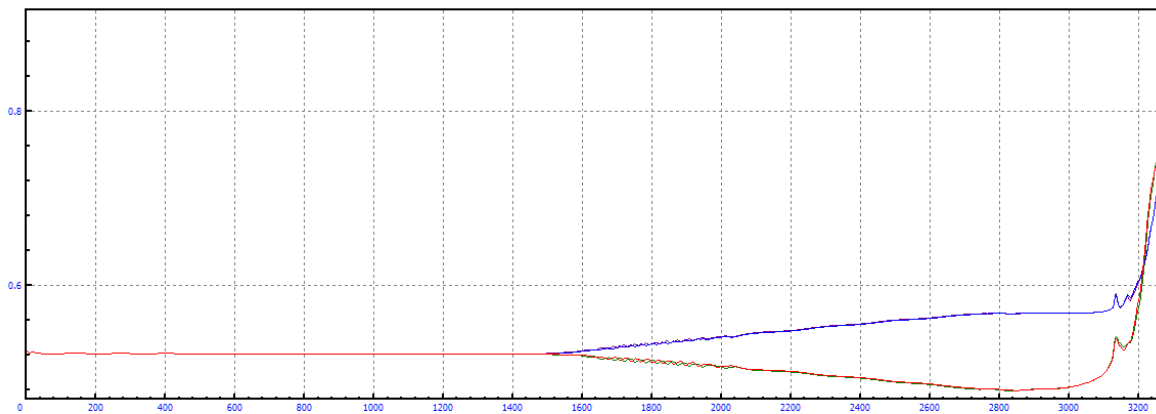


Figura A.629: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+40\%$ y $V=160\text{m/s}$

B.3.8 MODIFICACIÓN=+60%

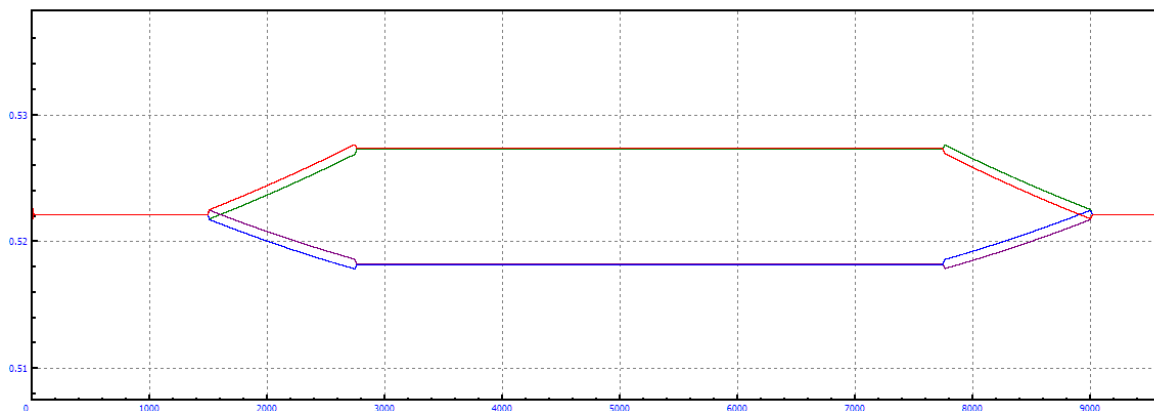


Figura A.630: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+60% y V=5m/s

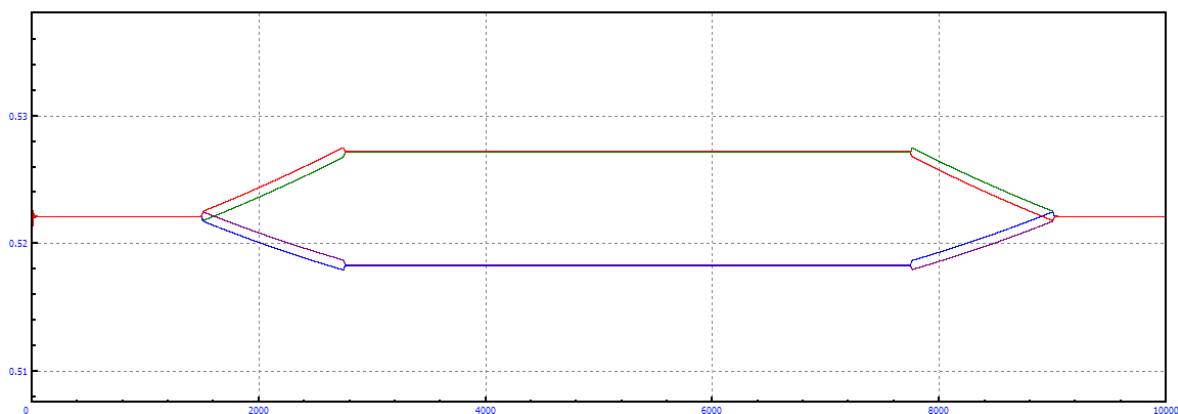


Figura A.631: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+60% y V=10m/s

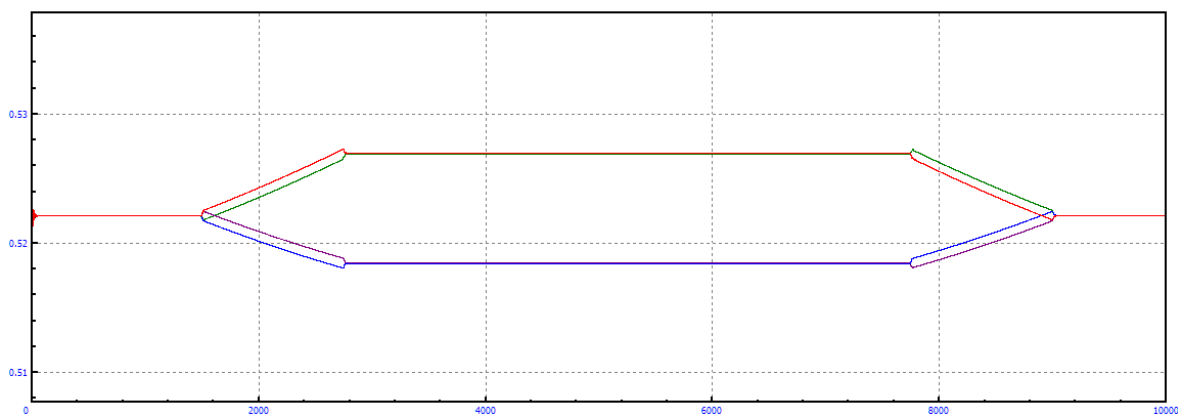


Figura A.632: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+60% y V=15m/s

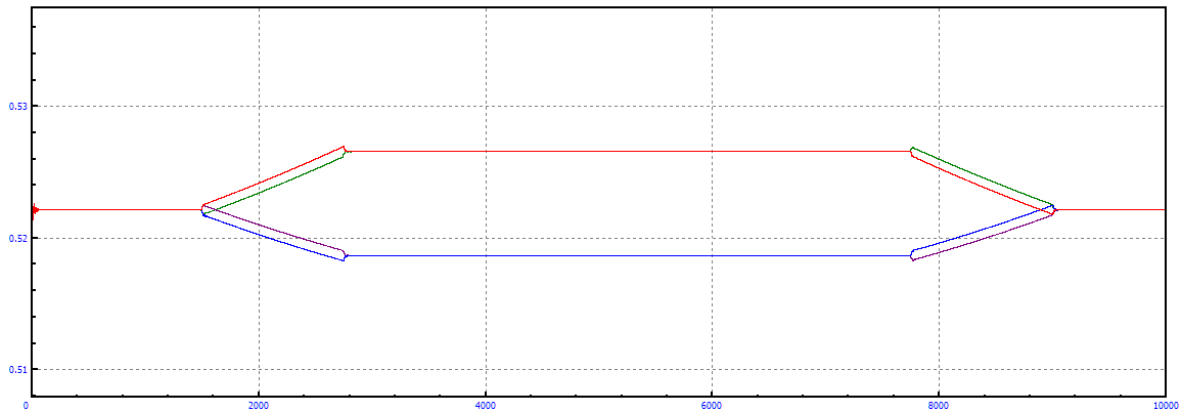


Figura A.633: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=20\text{m/s}$

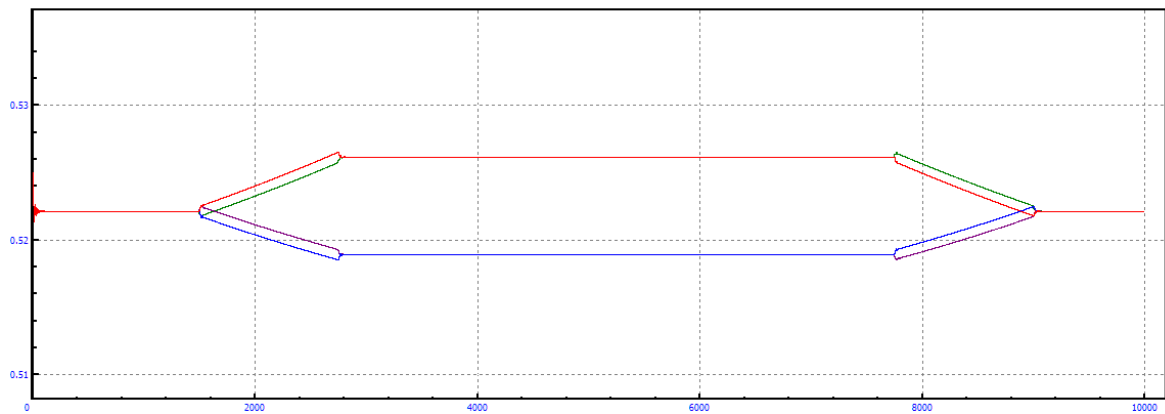


Figura A.634: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=25\text{m/s}$

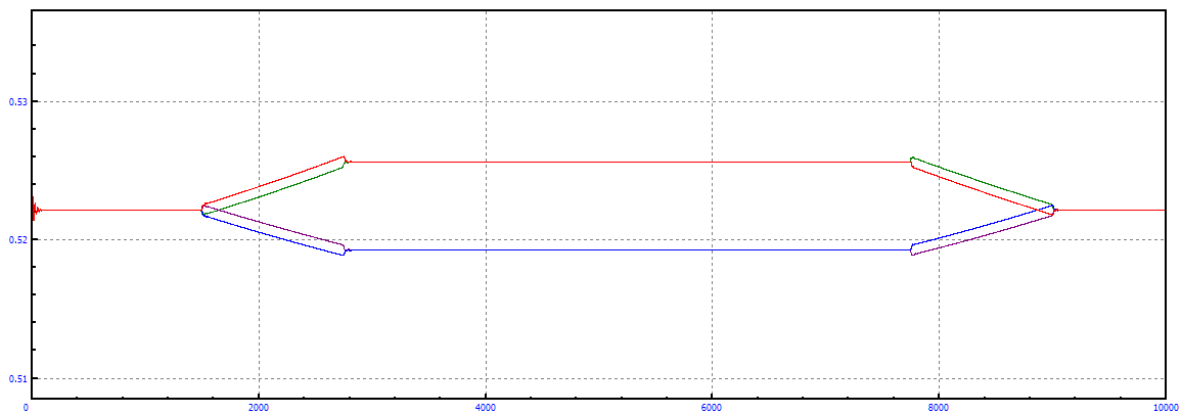


Figura A.635: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=30\text{m/s}$

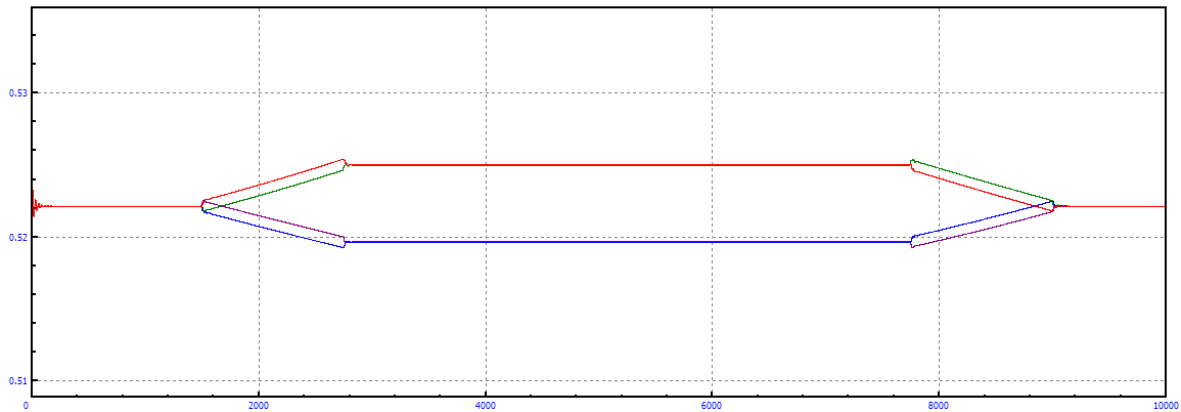


Figura A.636: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=35\text{m/s}$

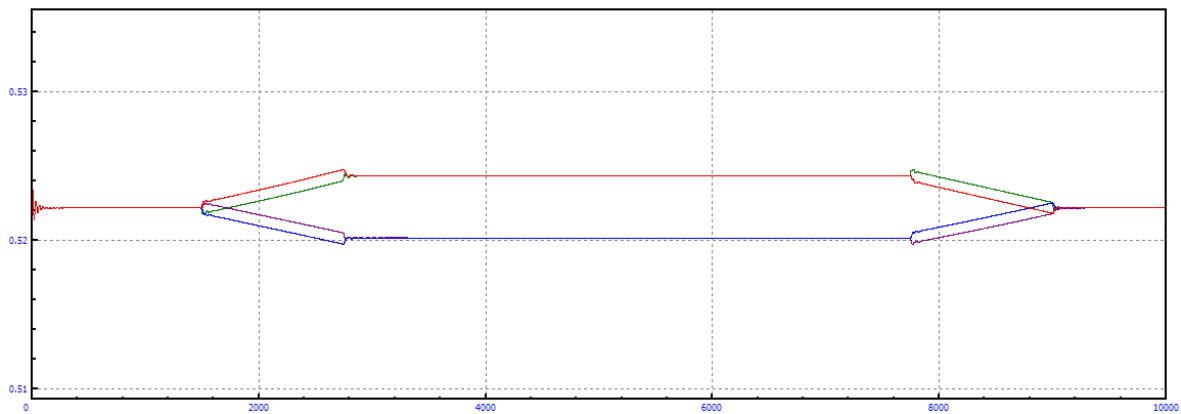


Figura A.637: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=40\text{m/s}$

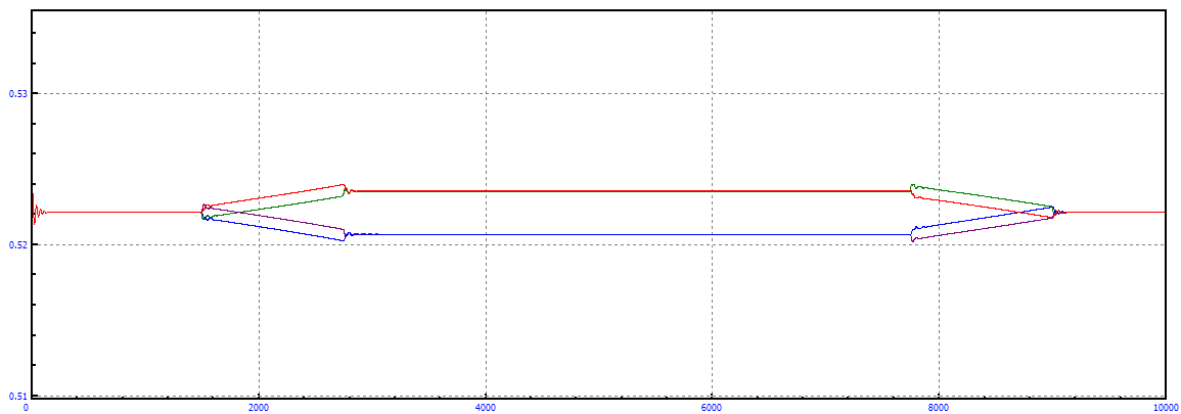


Figura A.638: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=45\text{m/s}$

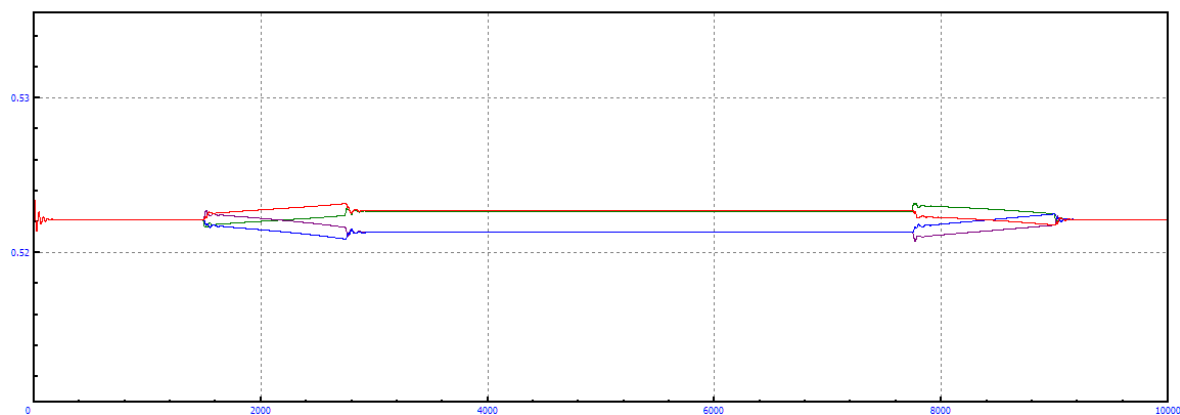


Figura A.639: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=50\text{m/s}$

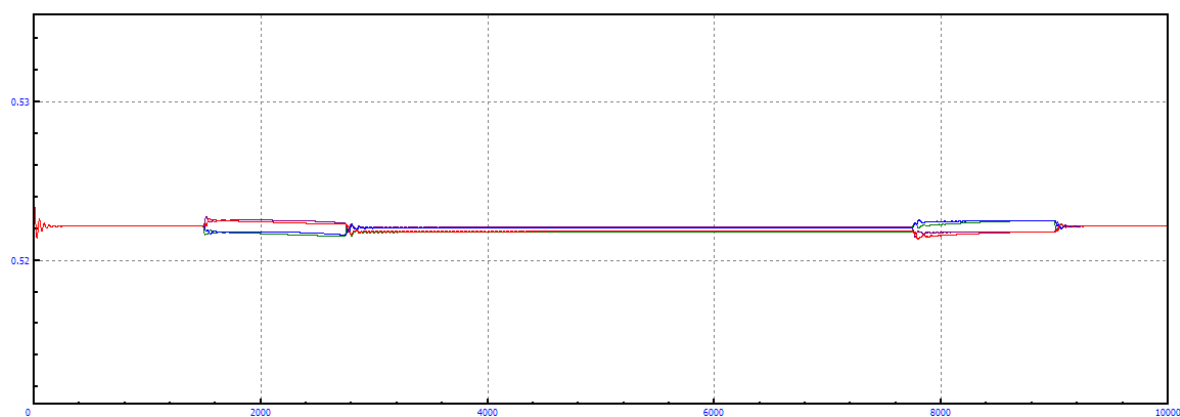


Figura A.640: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=55\text{m/s}$

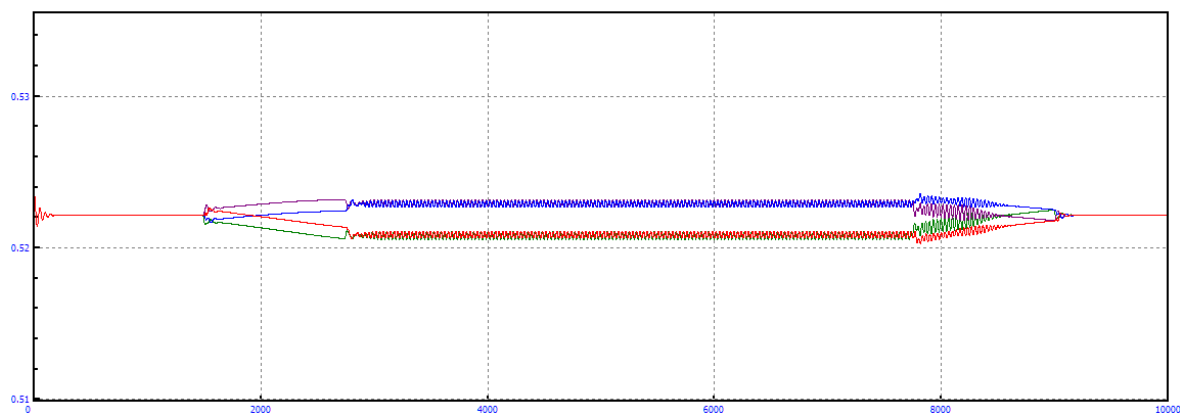


Figura A.641: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=60\text{m/s}$

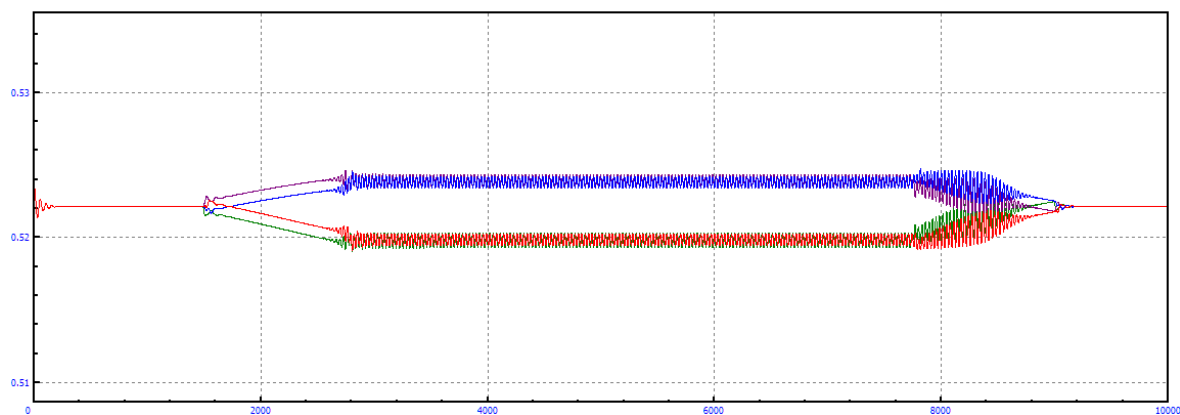


Figura A.642: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=65\text{m/s}$

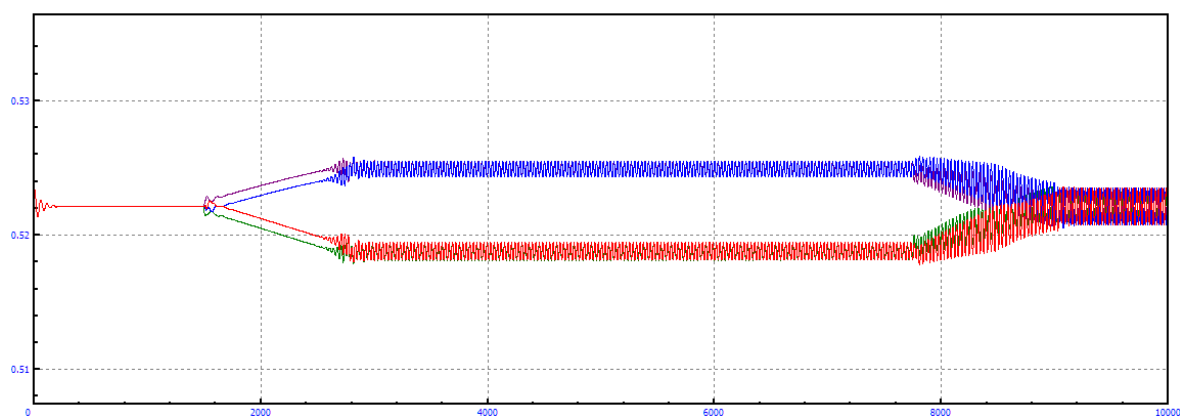


Figura A.643: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=70\text{m/s}$

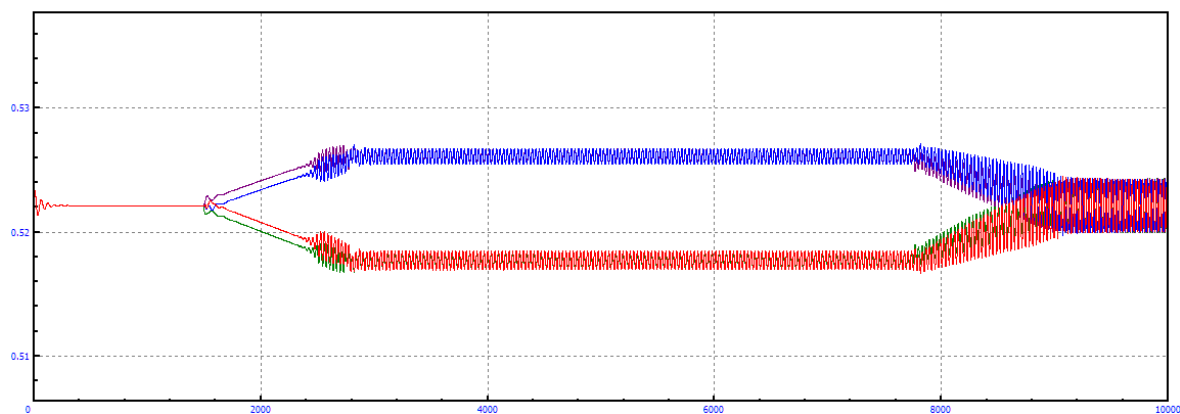


Figura A.644: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=75\text{m/s}$

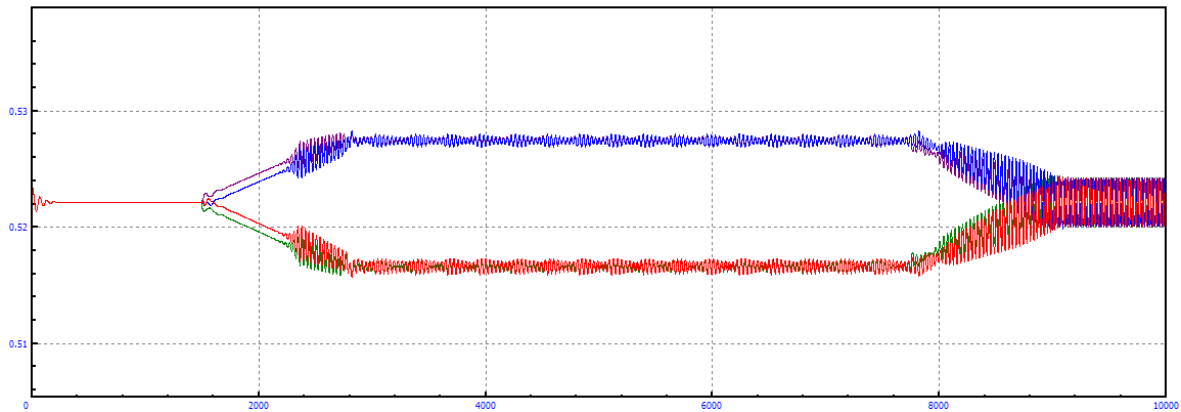


Figura A.645: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=80\text{m/s}$

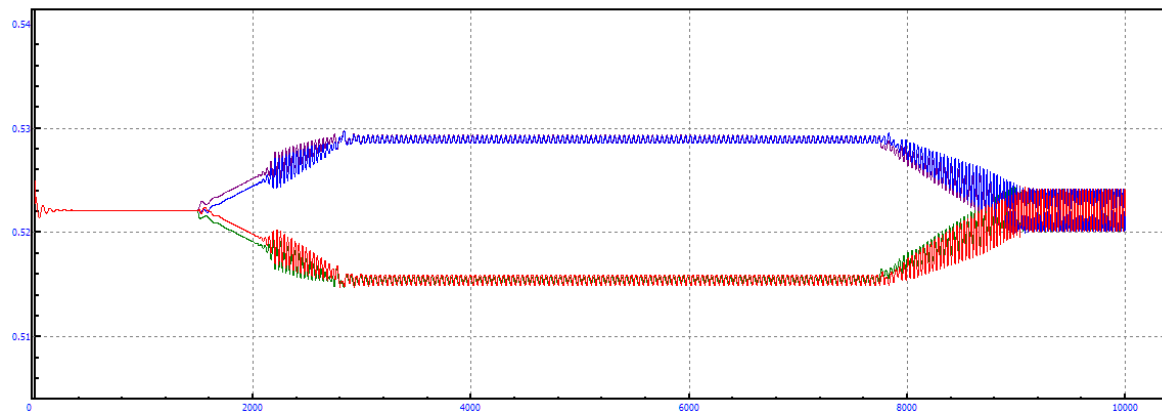


Figura A.646: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=85\text{m/s}$

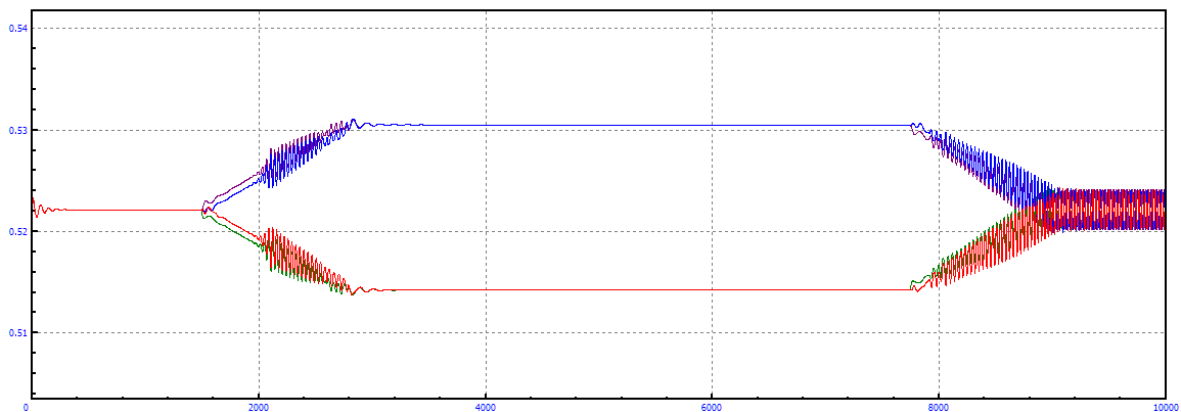


Figura A.647: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=90\text{m/s}$

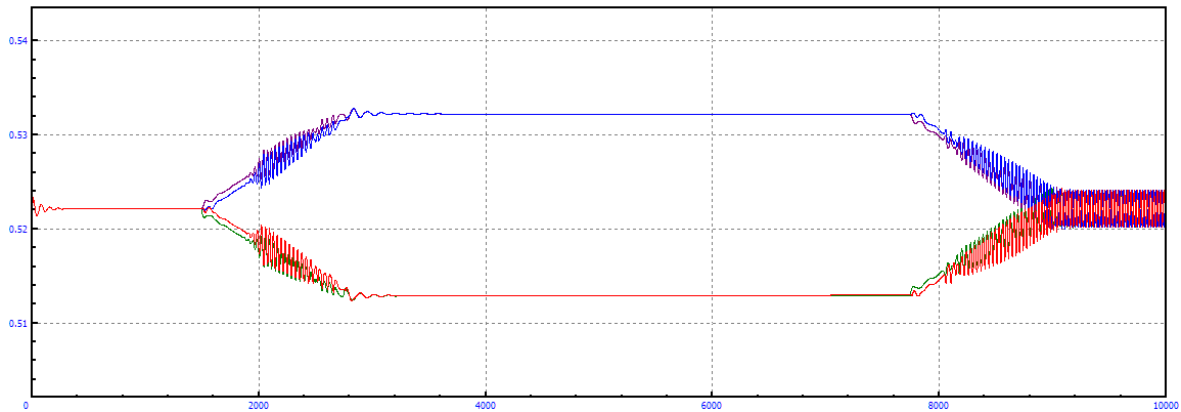


Figura A.648: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=95\text{m/s}$

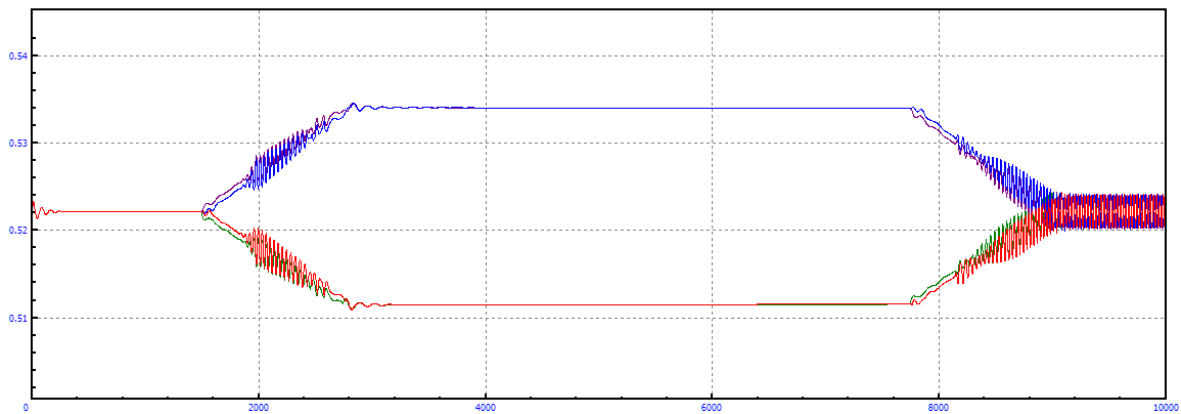


Figura A.649: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=100\text{m/s}$

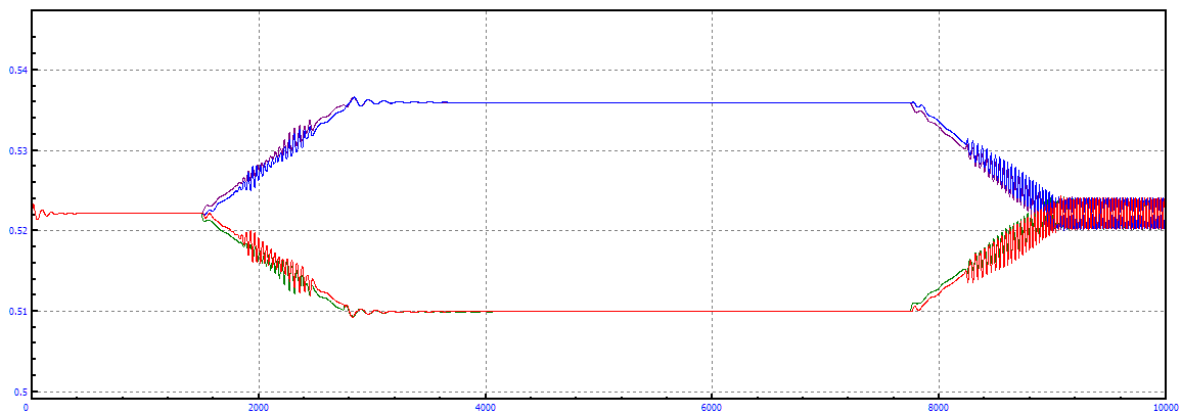


Figura A.650: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+60\%$ y $V=105\text{m/s}$

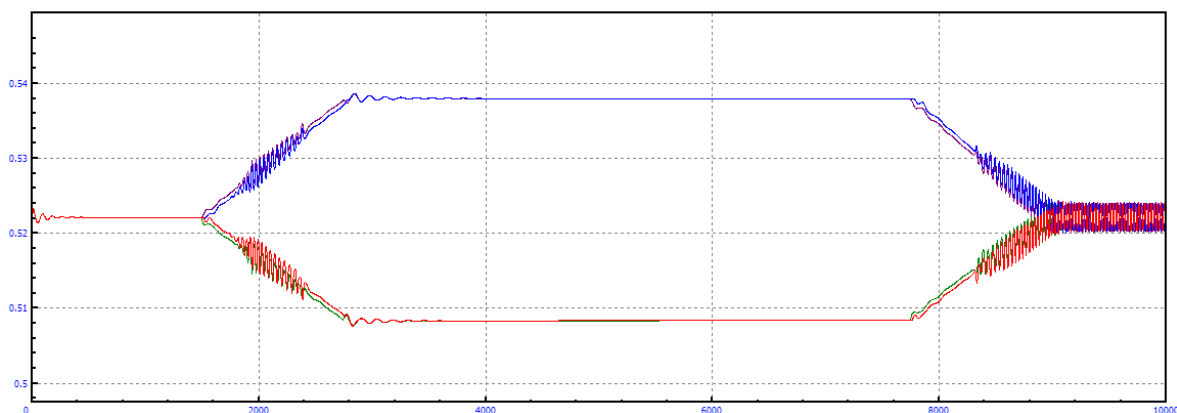


Figura A.651: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=110\text{m/s}$

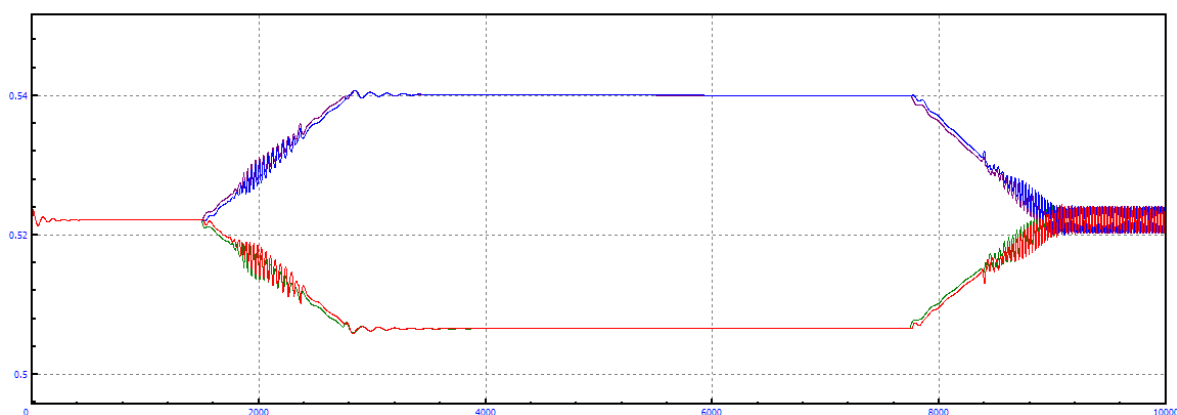


Figura A.652: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=115\text{m/s}$

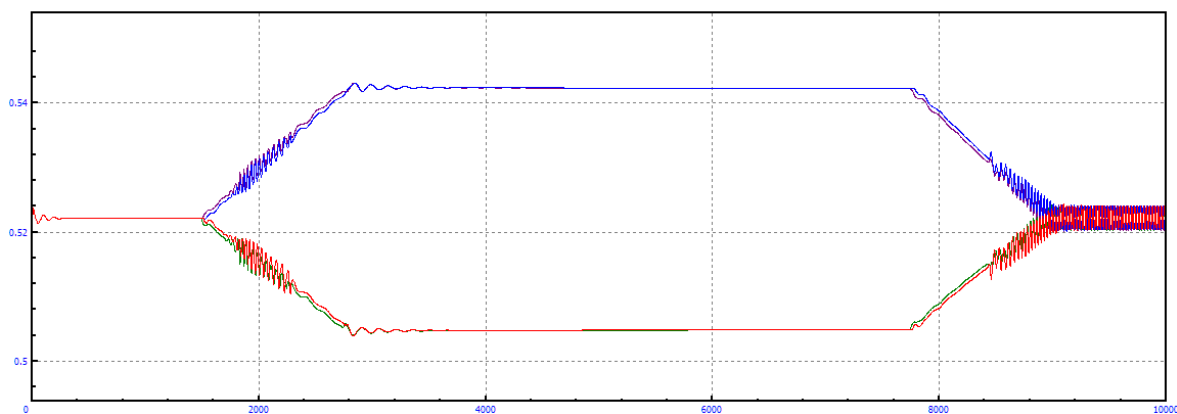


Figura A.653: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=120\text{m/s}$

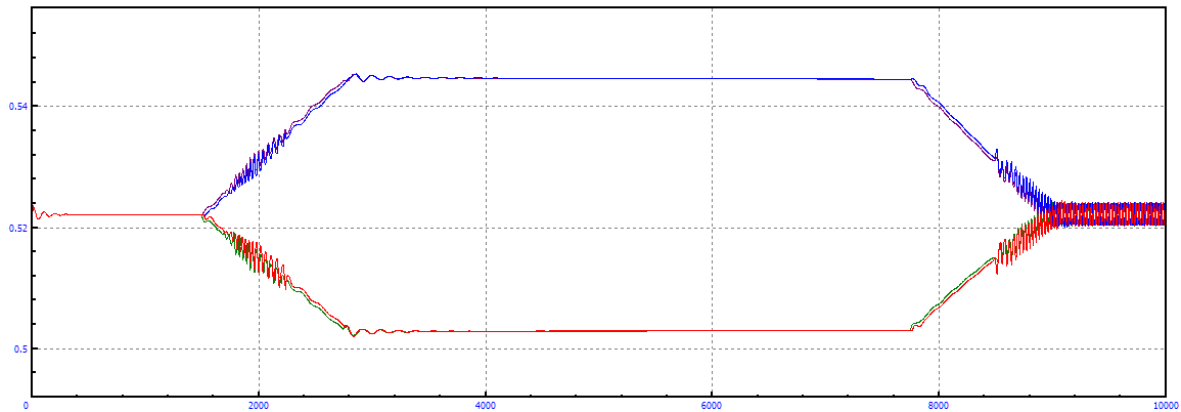


Figura A.654: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=125\text{m/s}$

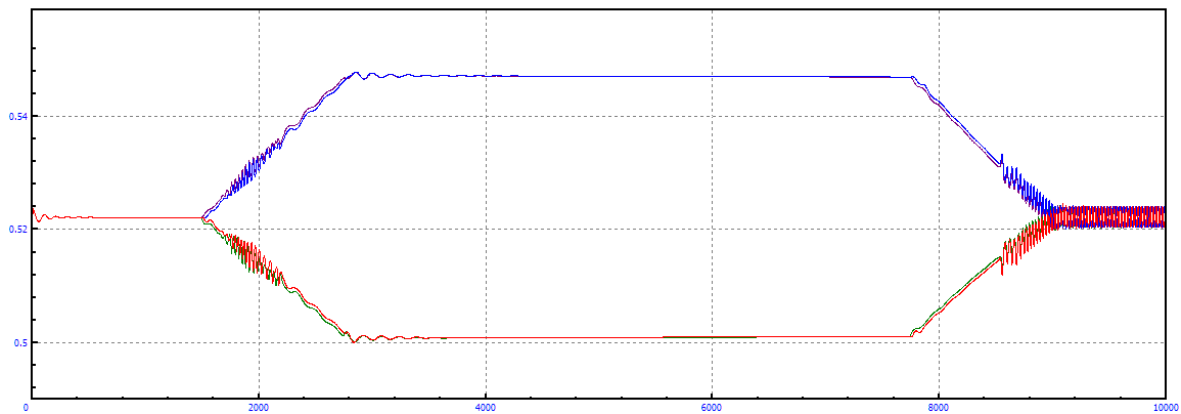


Figura A.655: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=130\text{m/s}$

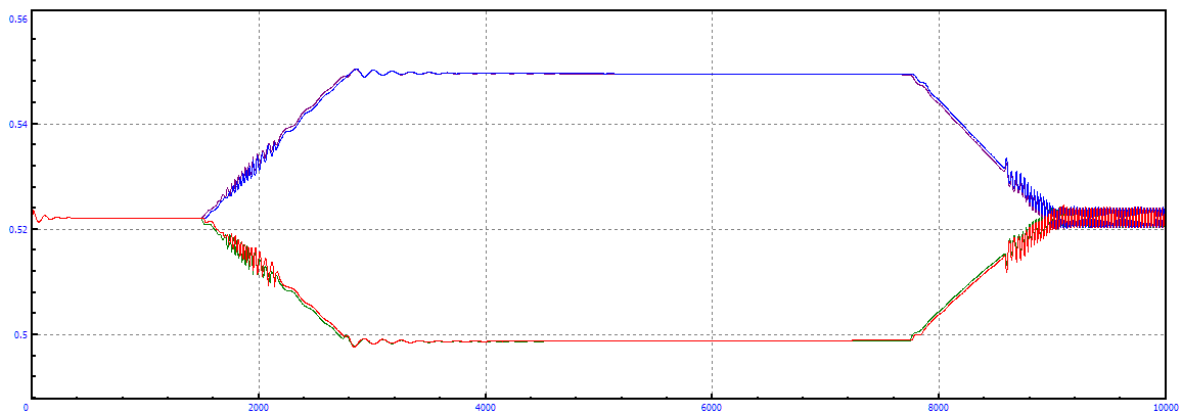


Figura A.656: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=135\text{m/s}$

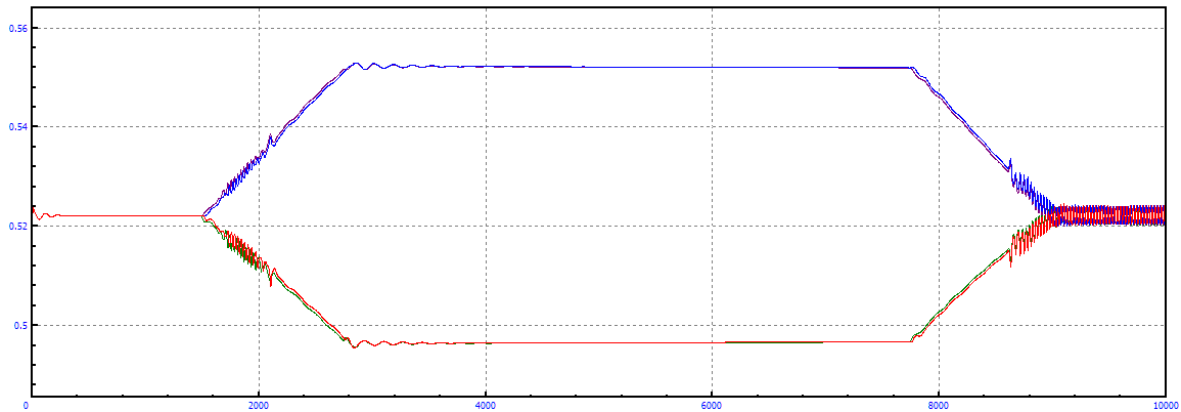


Figura A.657: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=140\text{m/s}$

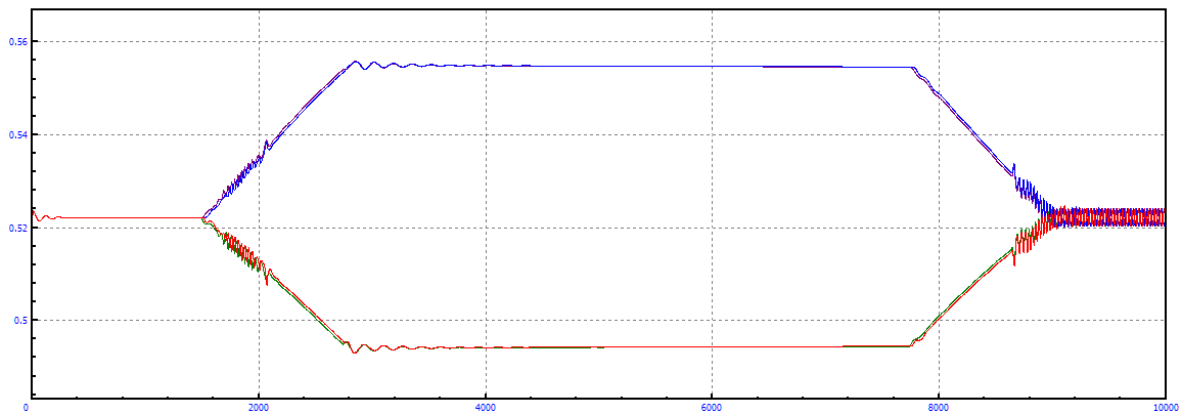


Figura A.658: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=145\text{m/s}$

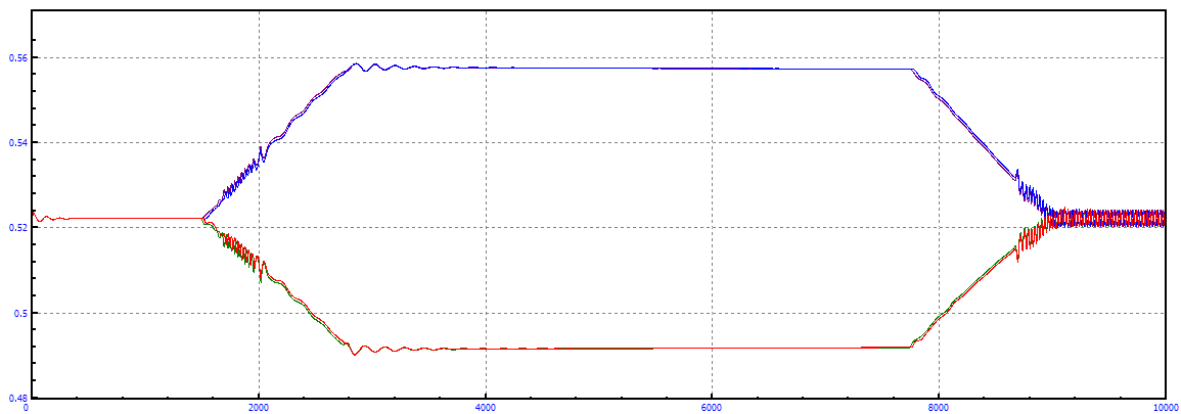


Figura A.659: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=150\text{m/s}$

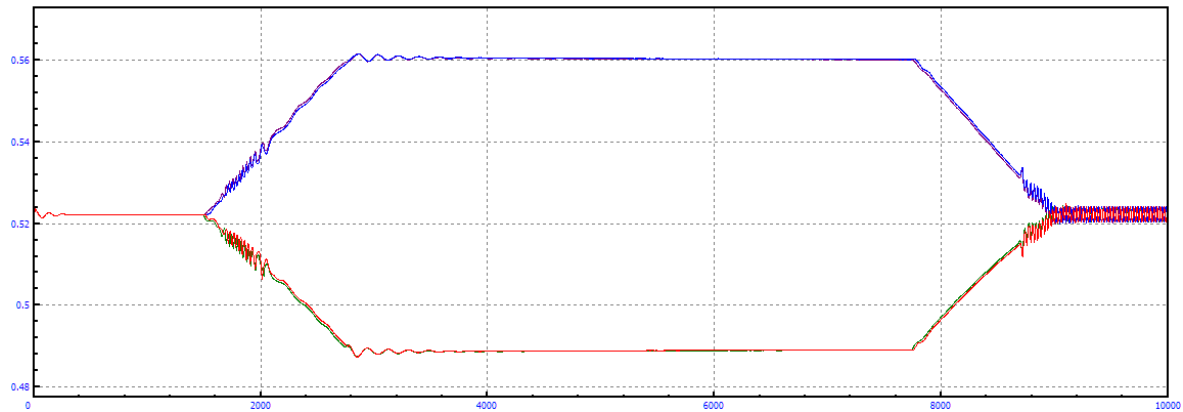


Figura A.660: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=155\text{m/s}$

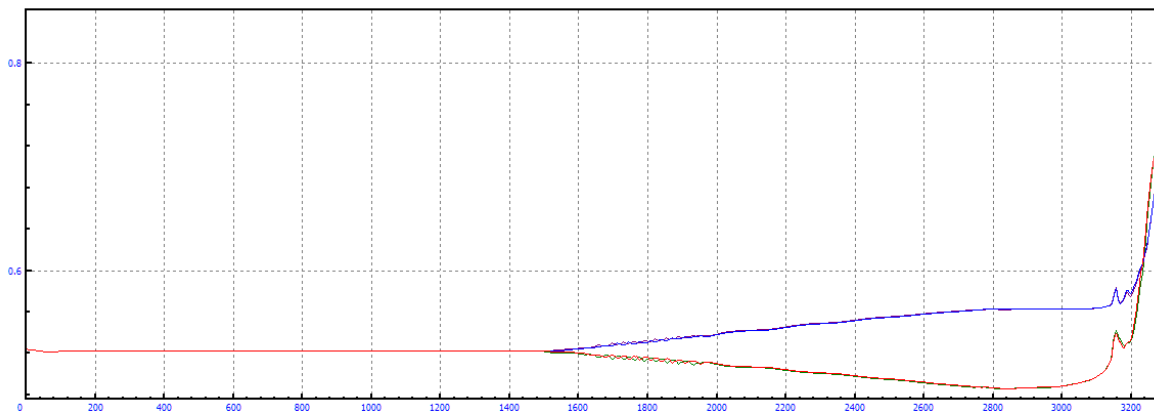


Figura A.661: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+60% y $V=160\text{m/s}$

B.3.9 MODIFICACIÓN=+80%

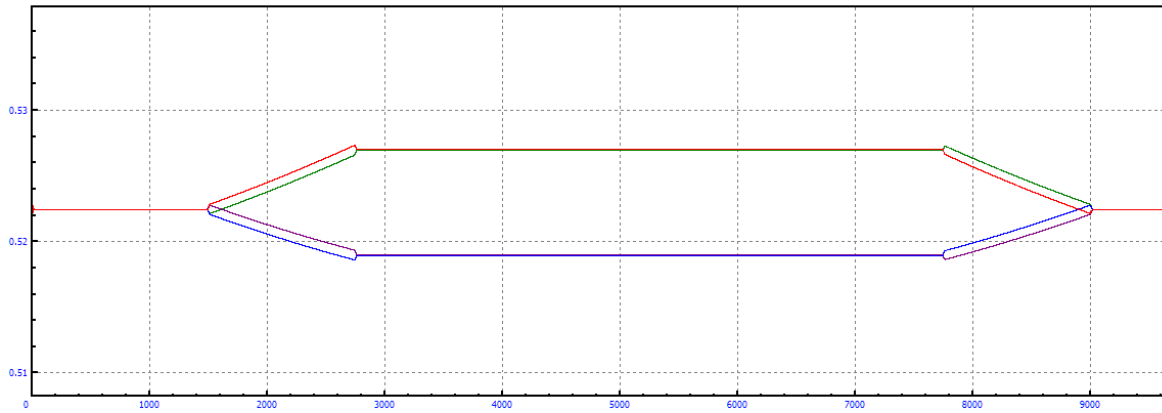


Figura A.662: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+80% y V=5m/s

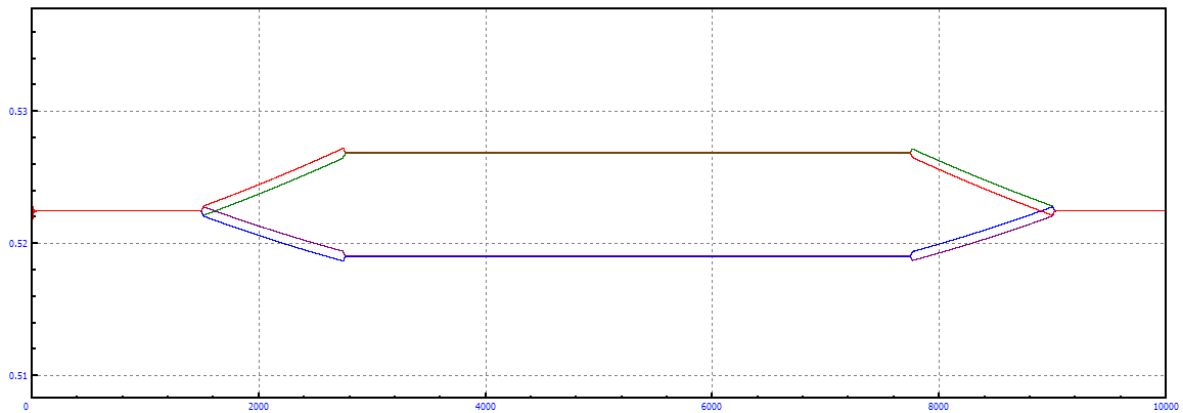


Figura A.663: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+80% y V=10m/s

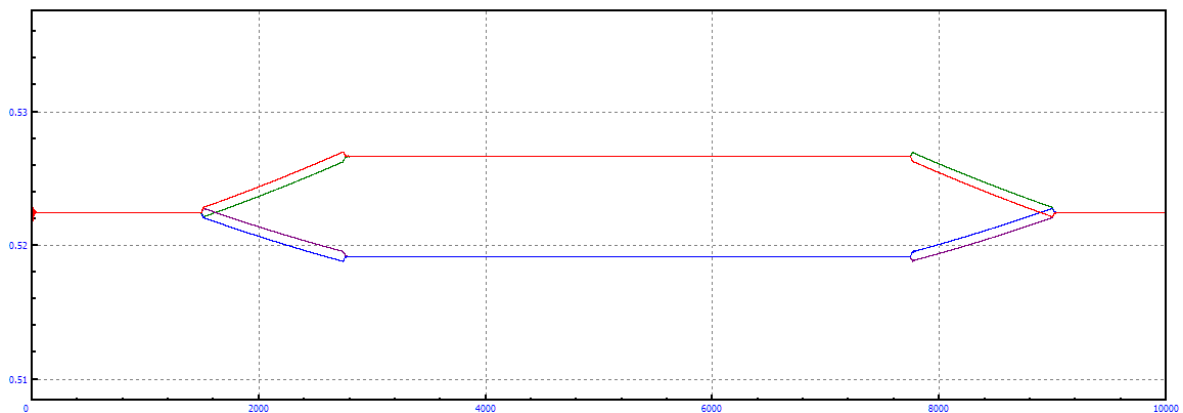


Figura A.664: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+80% y V=15m/s

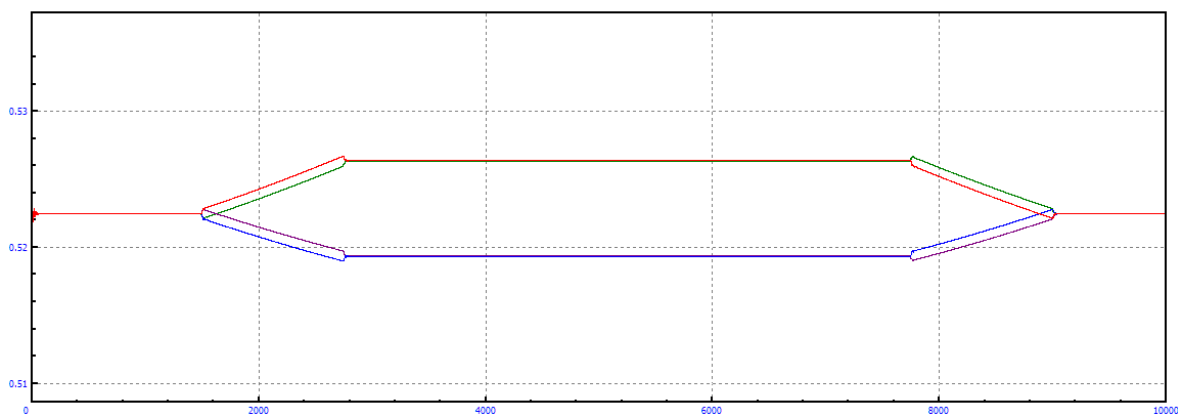


Figura A.665: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=20\text{m/s}$

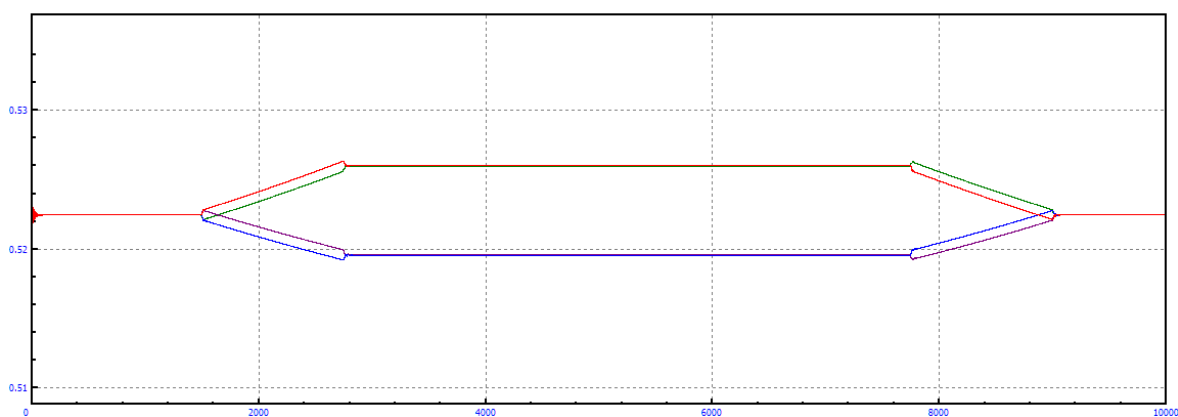


Figura A.666: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=25\text{m/s}$

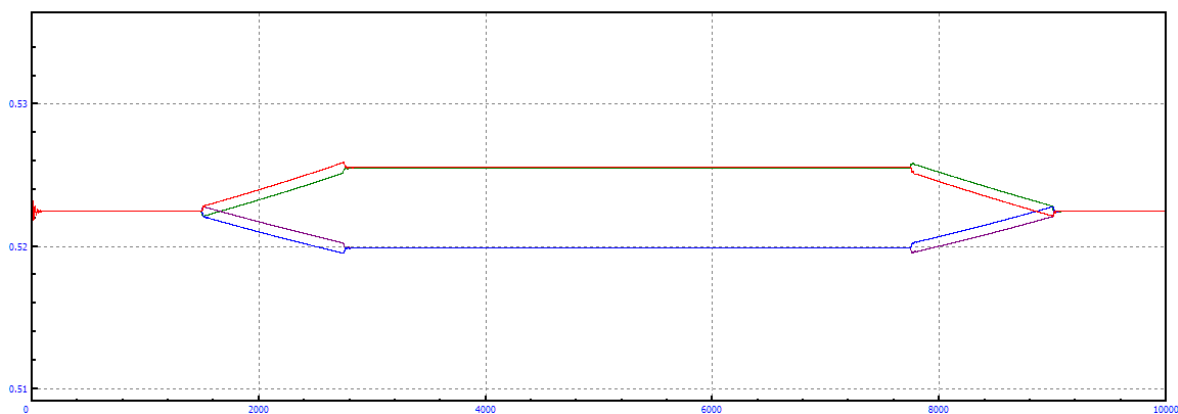


Figura A.667: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=30\text{m/s}$

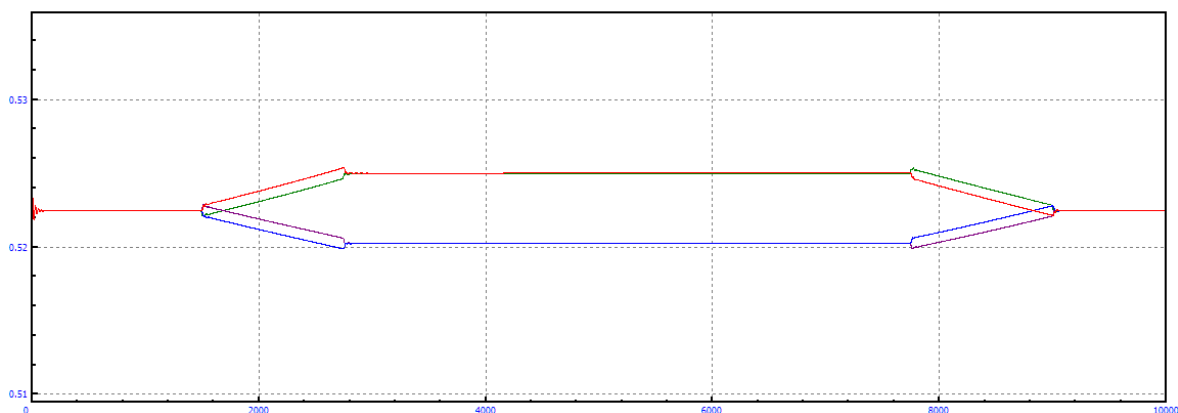


Figura A.668: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=35\text{m/s}$

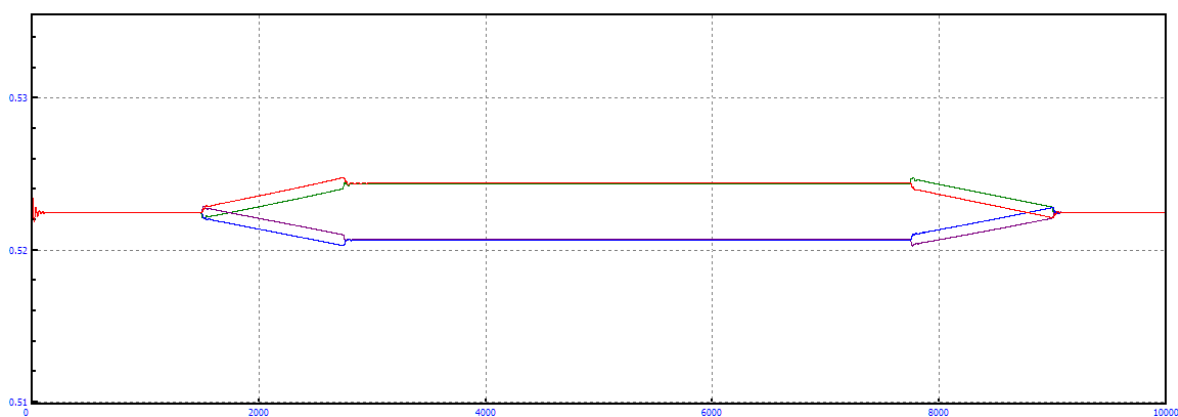


Figura A.669: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=40\text{m/s}$

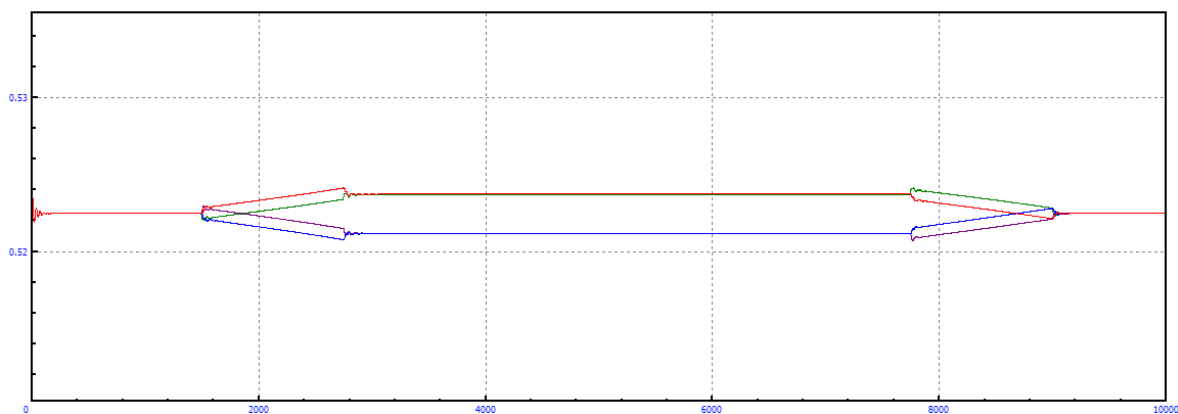


Figura A.670: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=45\text{m/s}$

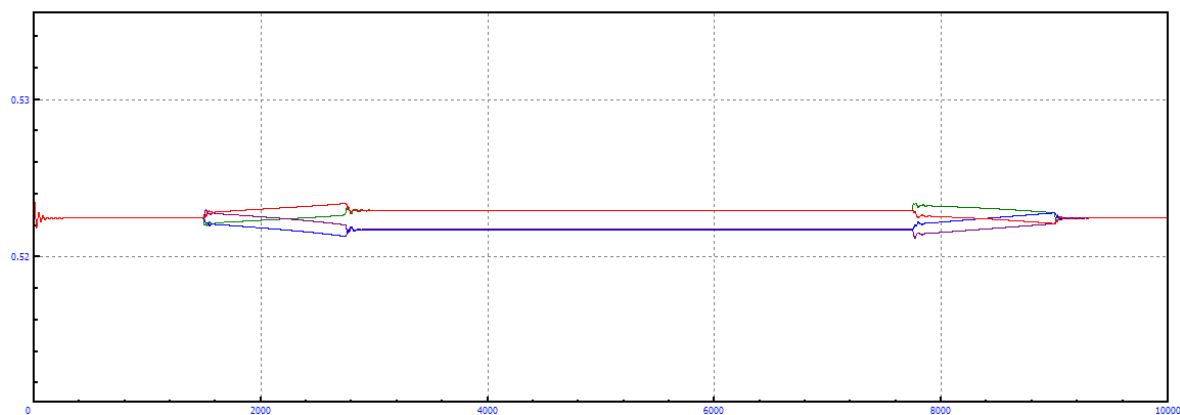


Figura A.671: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+80% y V=50m/s

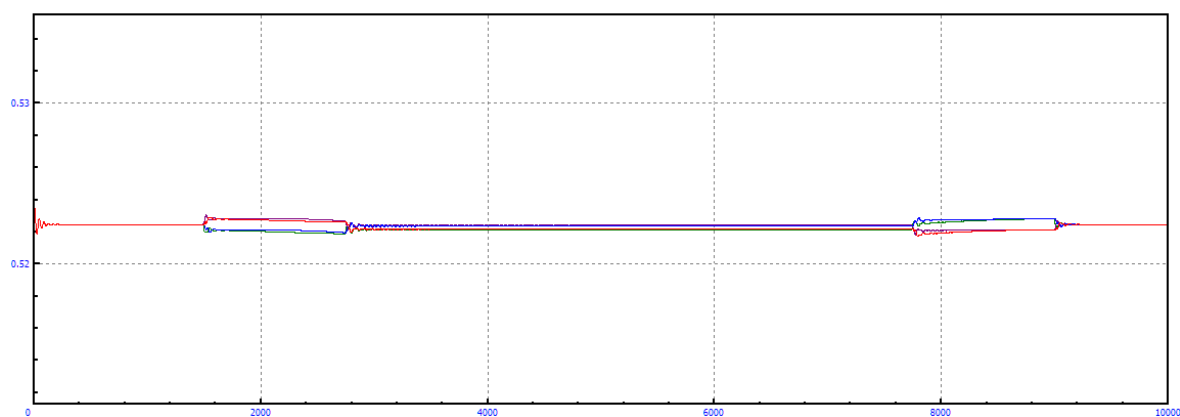


Figura A.672: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+80% y V=55m/s

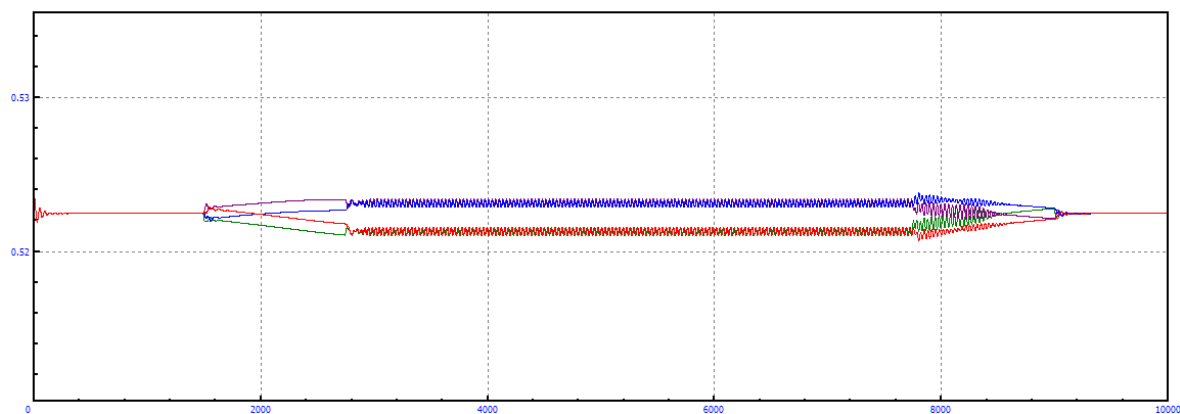


Figura A.673: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+80% y V=60m/s

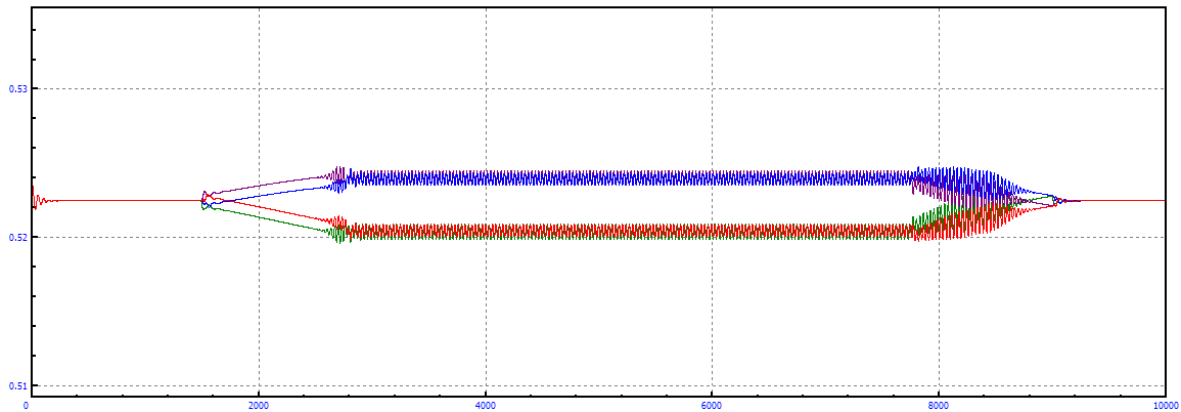


Figura A.674: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=65\text{m/s}$

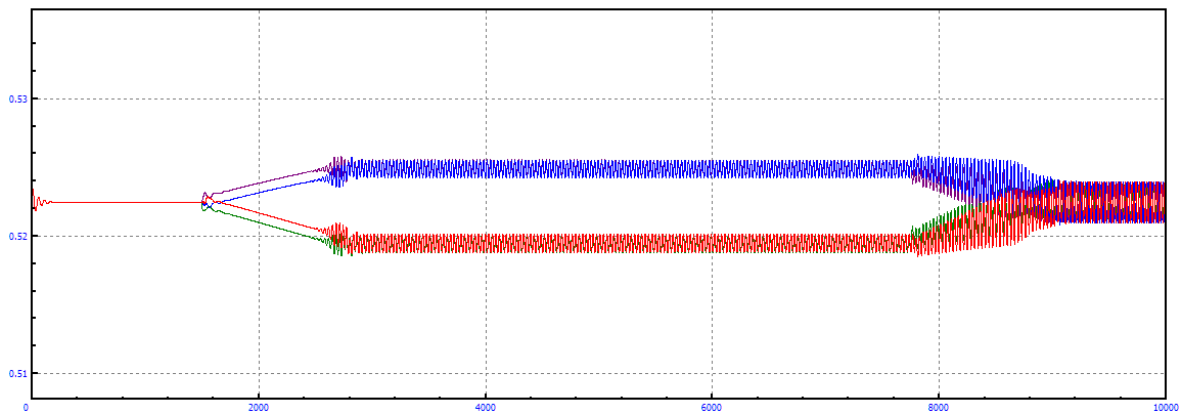


Figura A.675: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=70\text{m/s}$

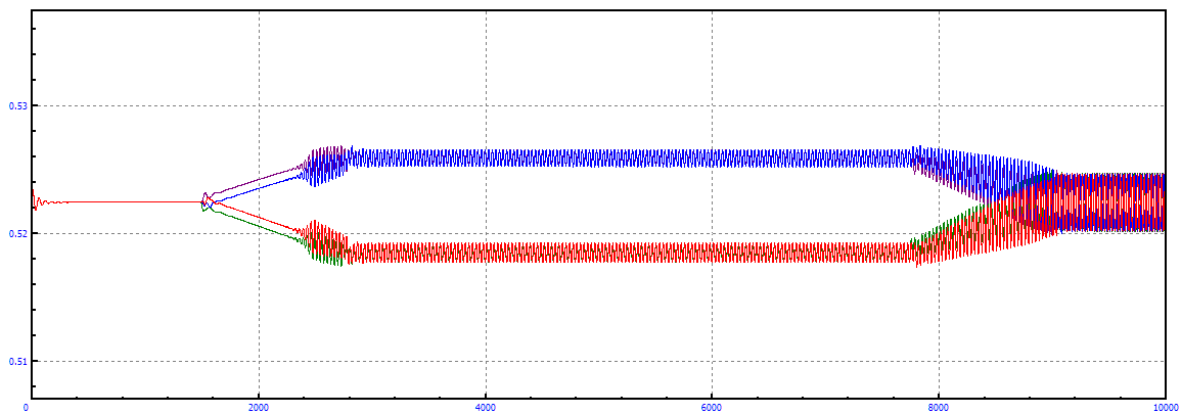


Figura A.676: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=75\text{m/s}$

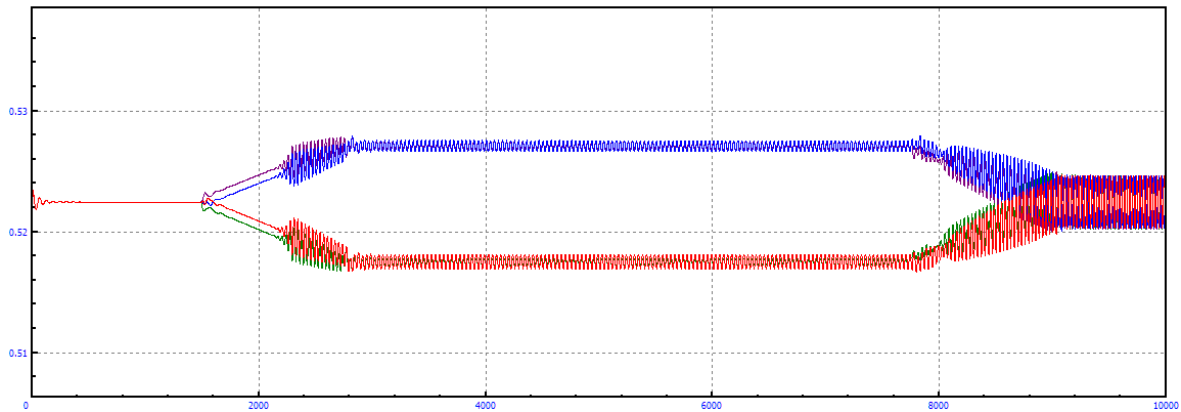


Figura A.677: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=80\text{m/s}$

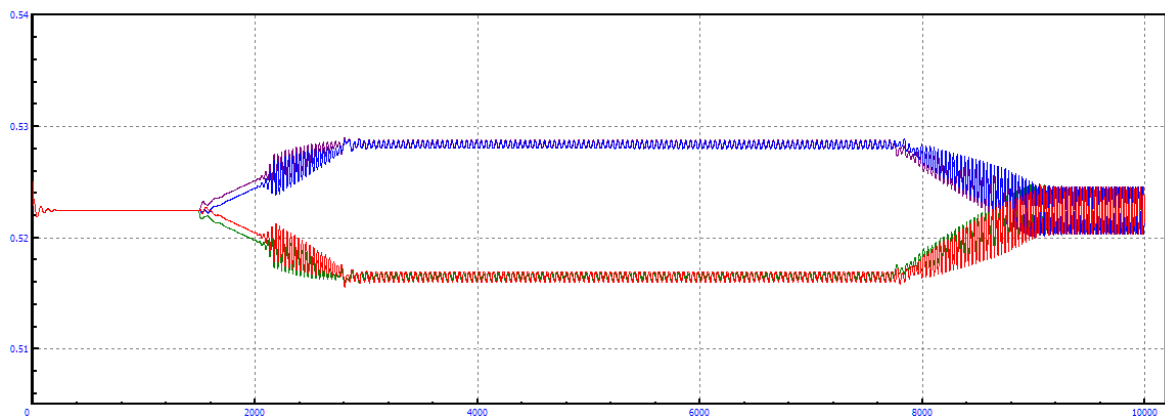


Figura A.678: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=85\text{m/s}$

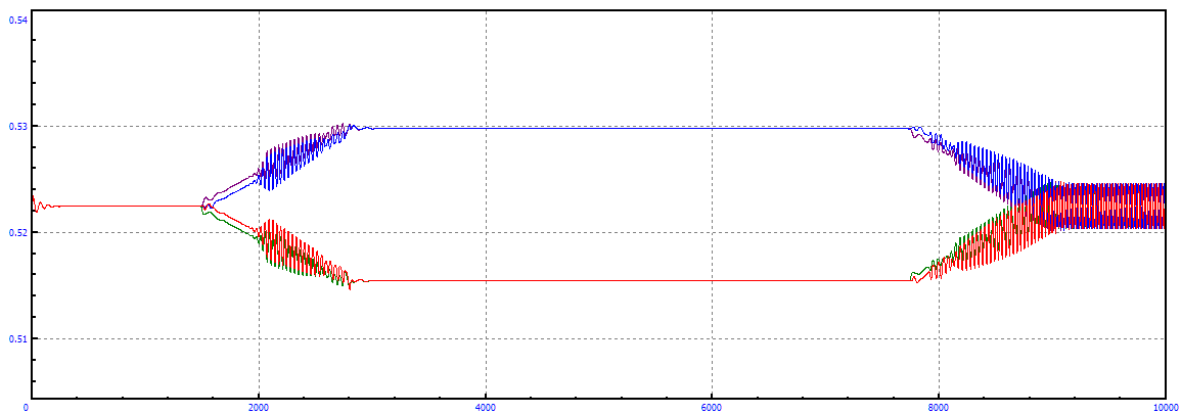


Figura A.679: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=90\text{m/s}$

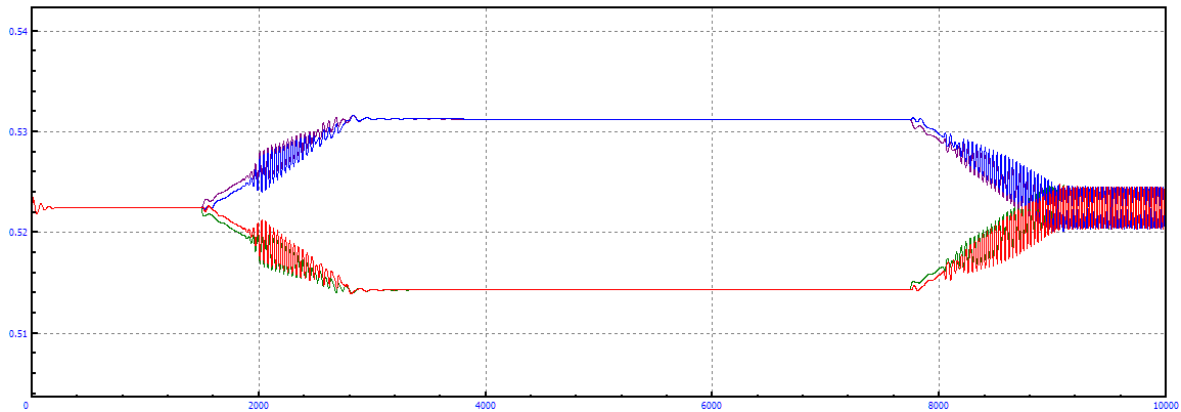


Figura A.680: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=95\text{m/s}$

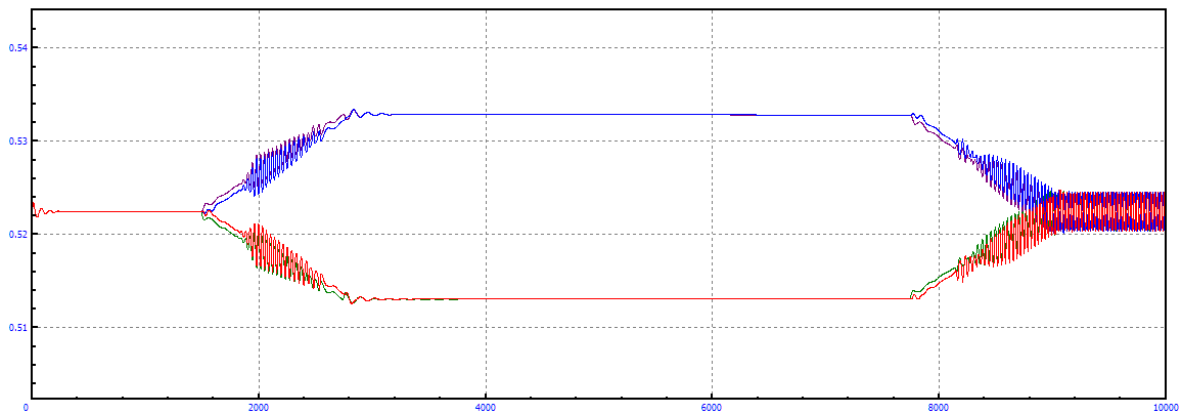


Figura A.681: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=100\text{m/s}$

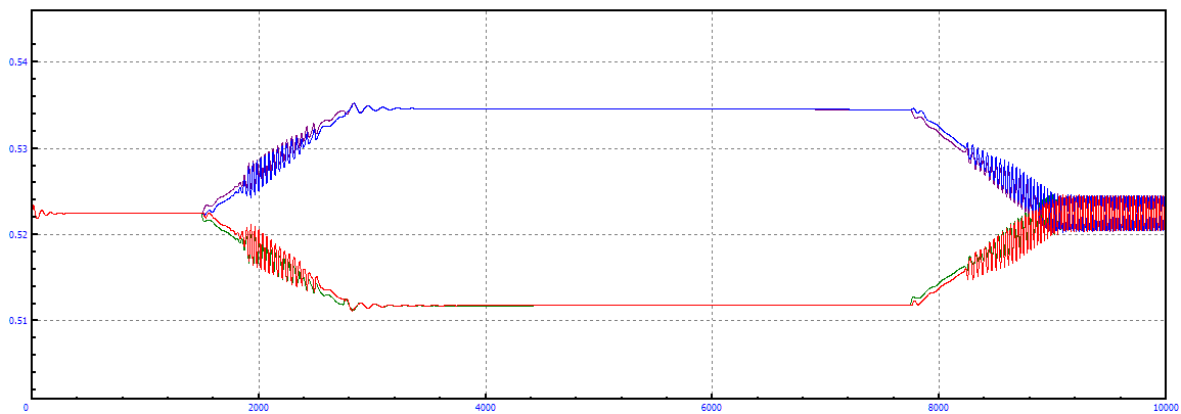


Figura A.682: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=105\text{m/s}$

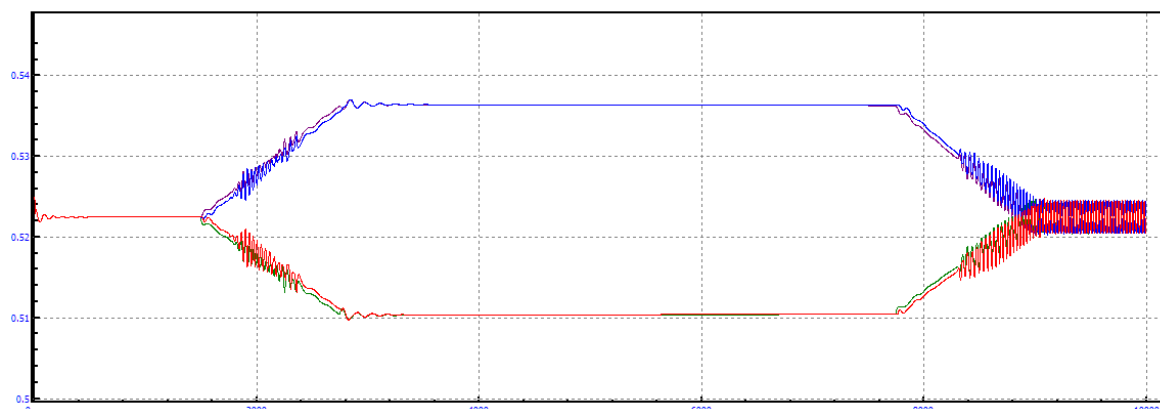


Figura A.683: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=110\text{m/s}$

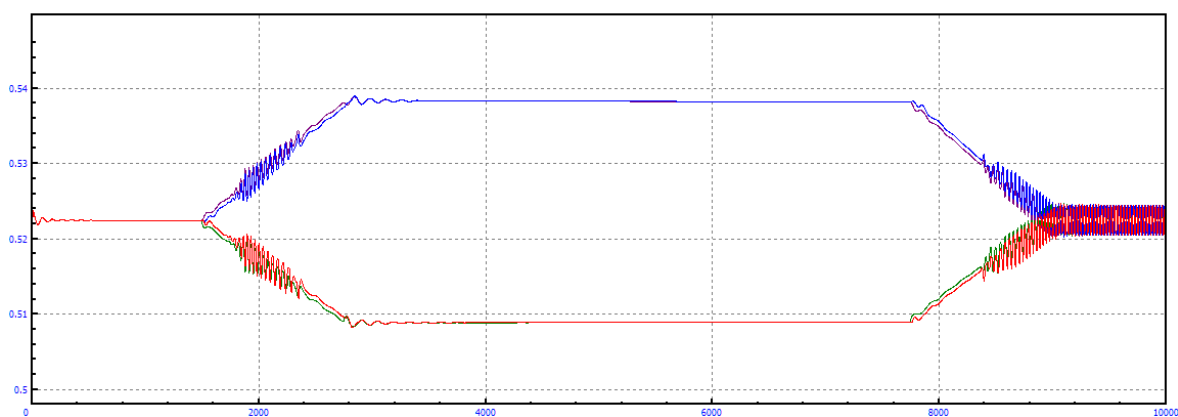


Figura A.684: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=115\text{m/s}$

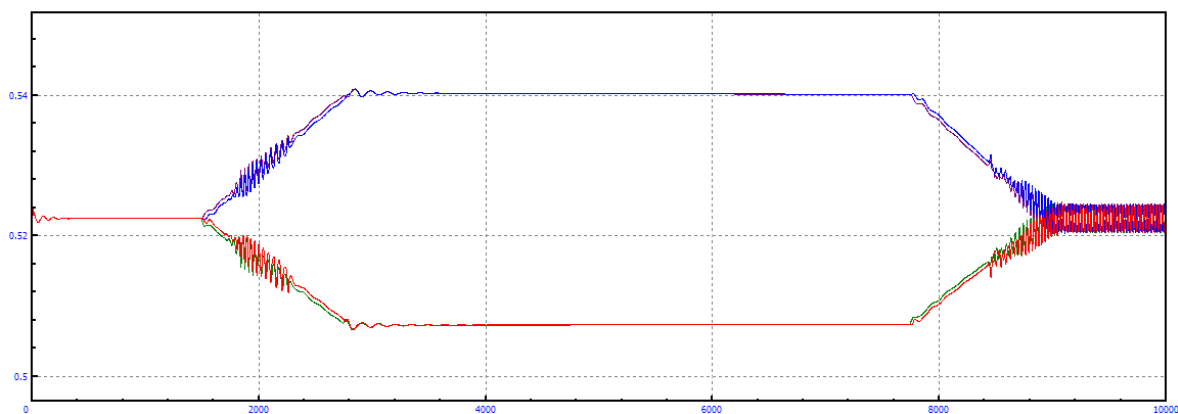


Figura A.685: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=120\text{m/s}$

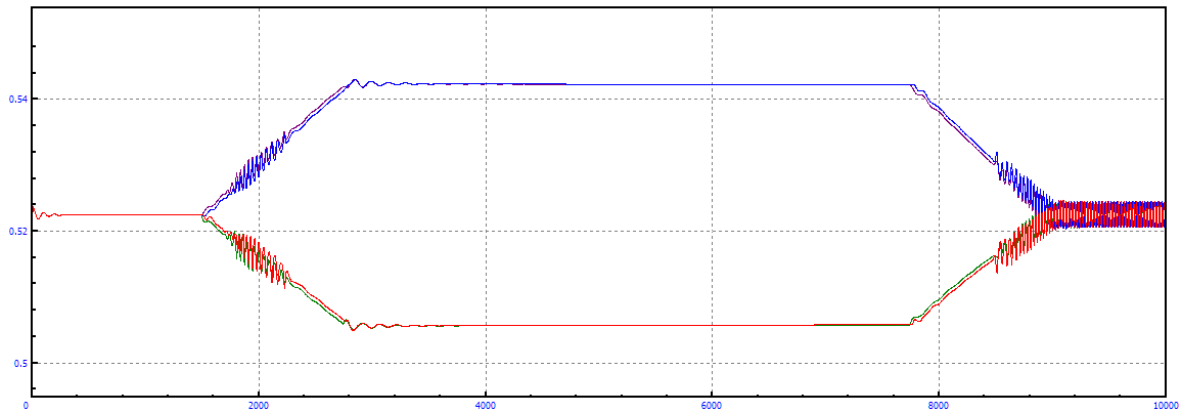


Figura A.686: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=125\text{m/s}$

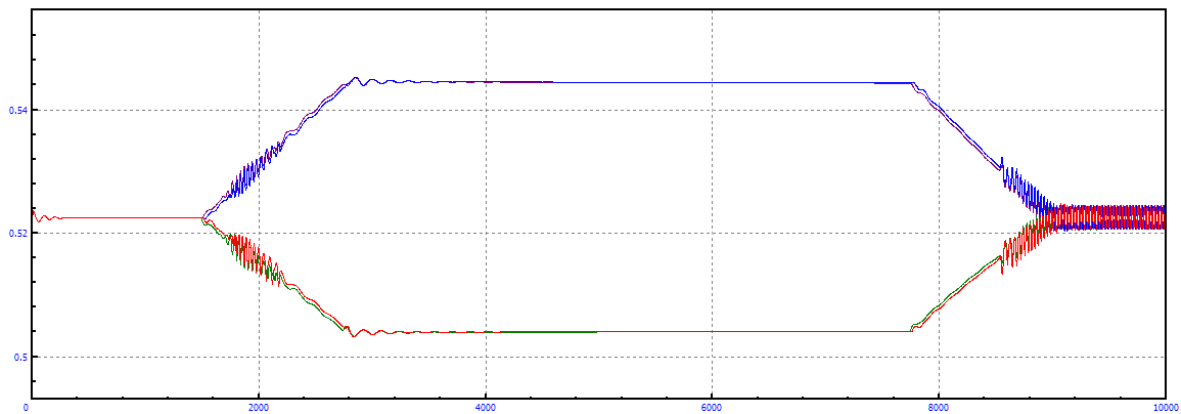


Figura A.687: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=130\text{m/s}$

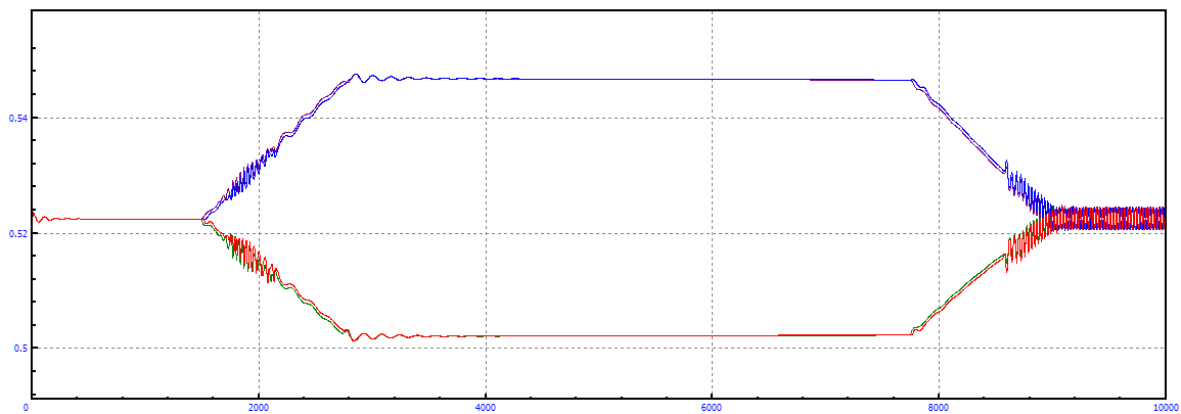


Figura A.688: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=135\text{m/s}$

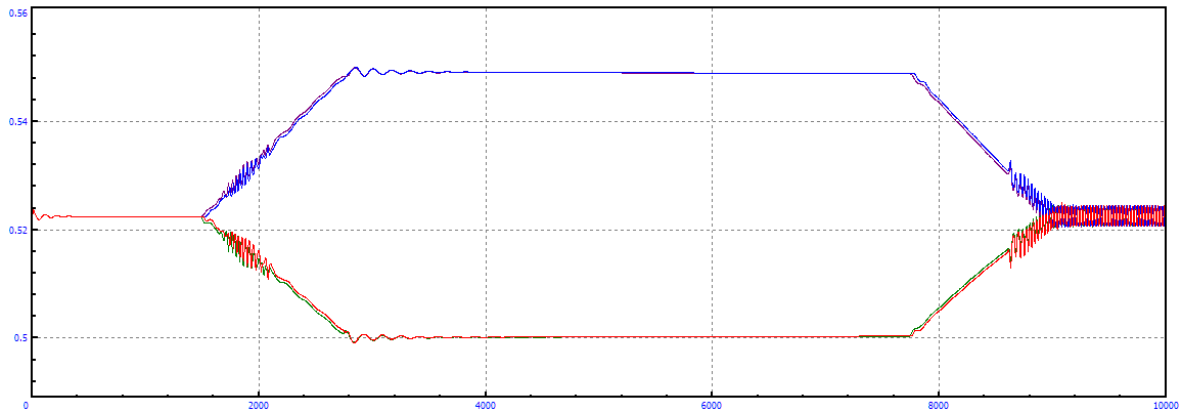


Figura A.689: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=140\text{m/s}$

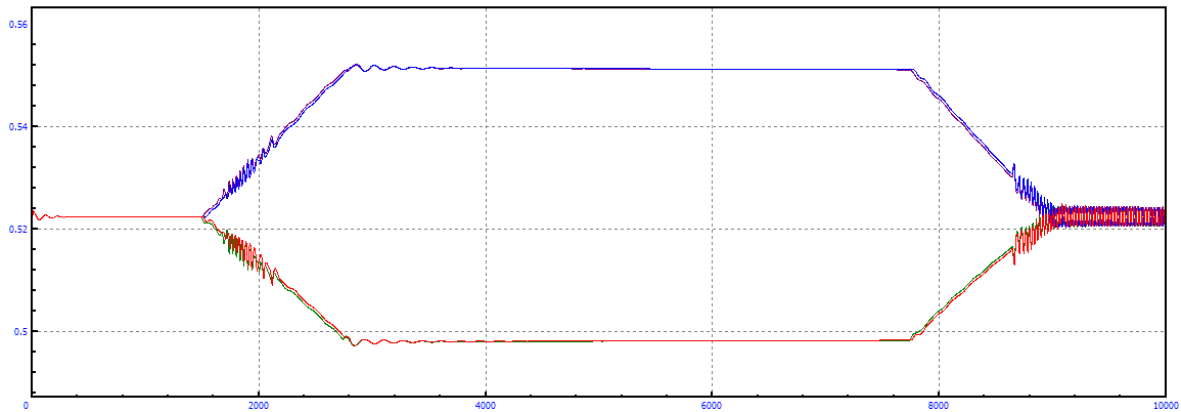


Figura A.690: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=145\text{m/s}$

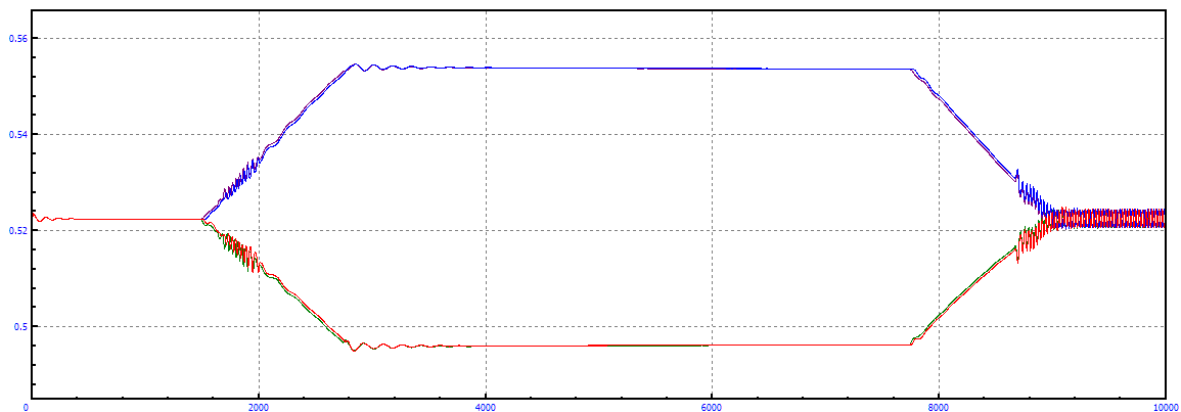


Figura A.691: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+80\%$ y $V=150\text{m/s}$

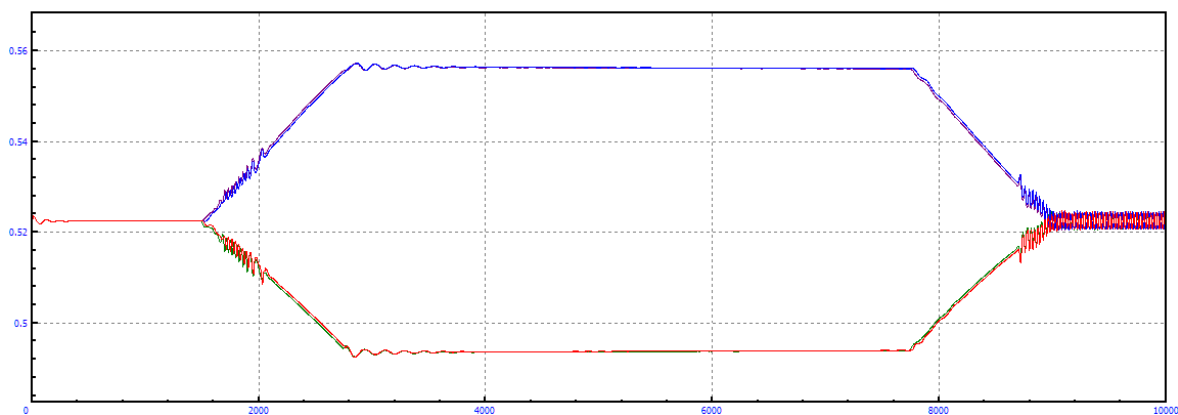


Figura A.692: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=155\text{m/s}$

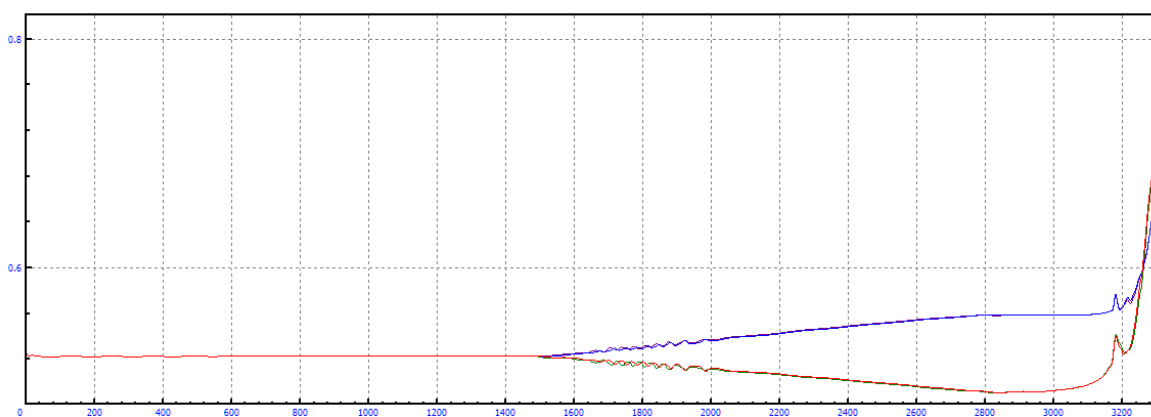


Figura A.693: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+80% y $V=160\text{m/s}$

B.3.10 MODIFICACIÓN=+100%

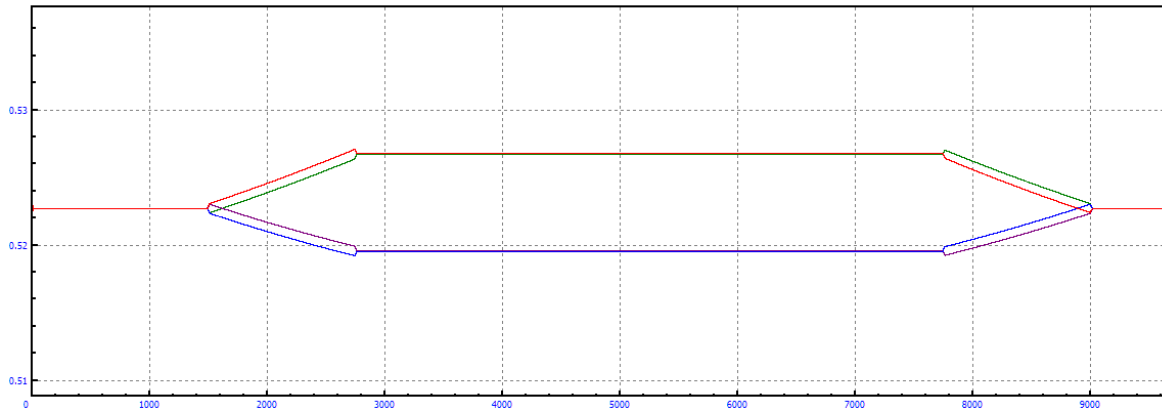


Figura A.694: Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+100% y V=5m/s

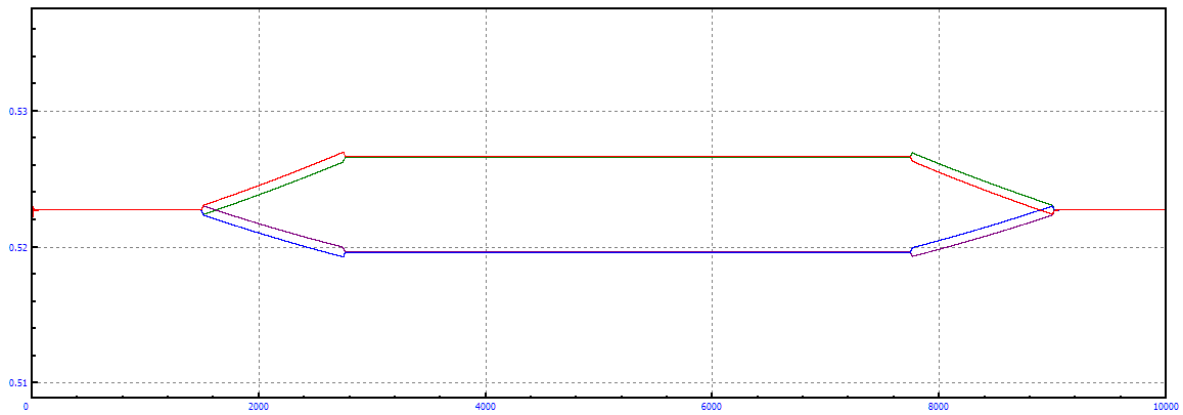


Figura A.695 Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+100% y V=10m/s

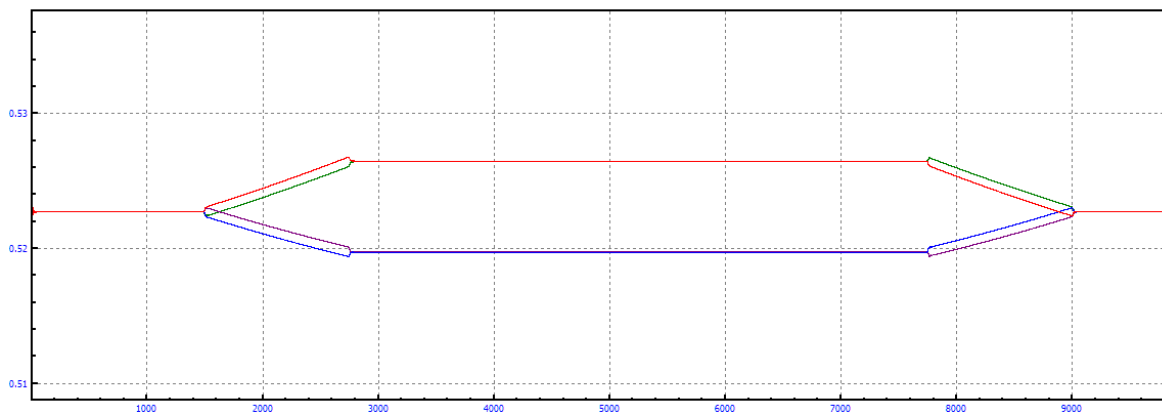


Figura A.696 Longitud amortiguadores en curva R=5km, amortiguación secundaria=+100% y V=15m/s

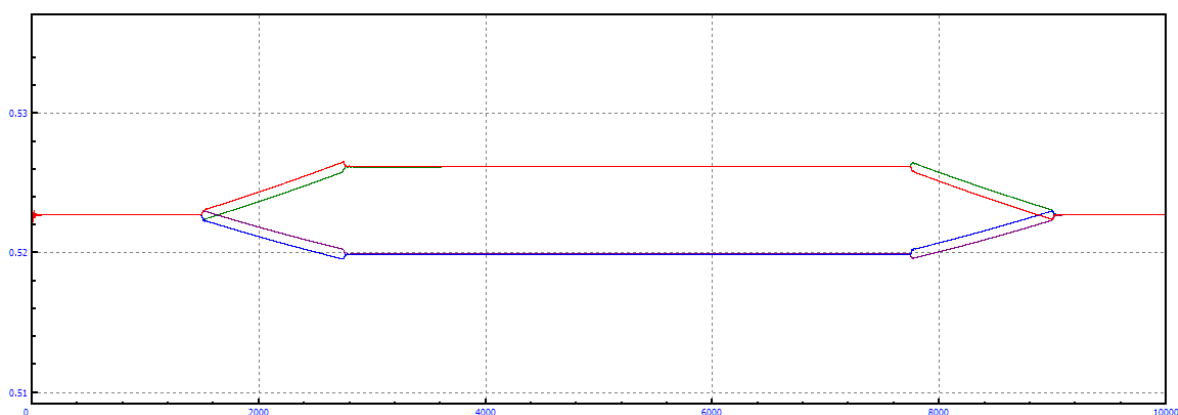


Figura A.697: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=20\text{m/s}$

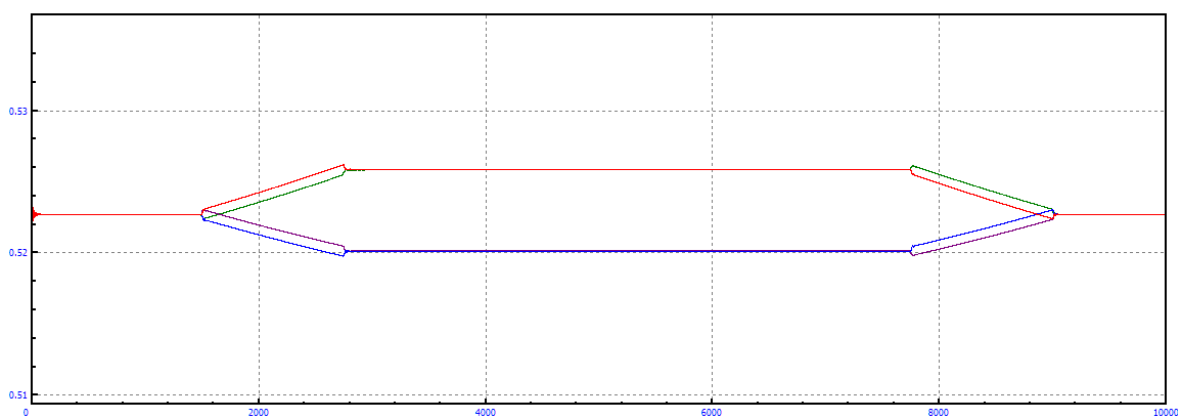


Figura A.698: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=25\text{m/s}$

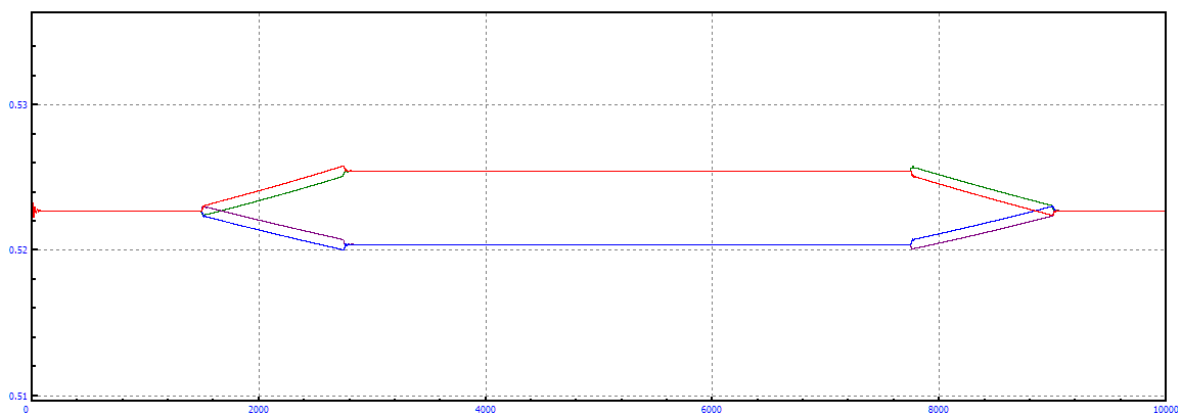


Figura A.699: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=30\text{m/s}$

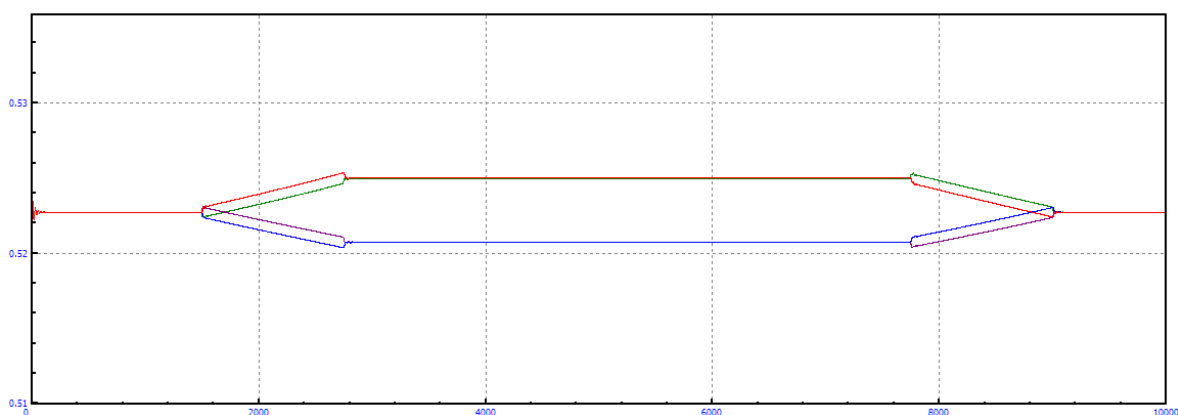


Figura A.700: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=35\text{m/s}$

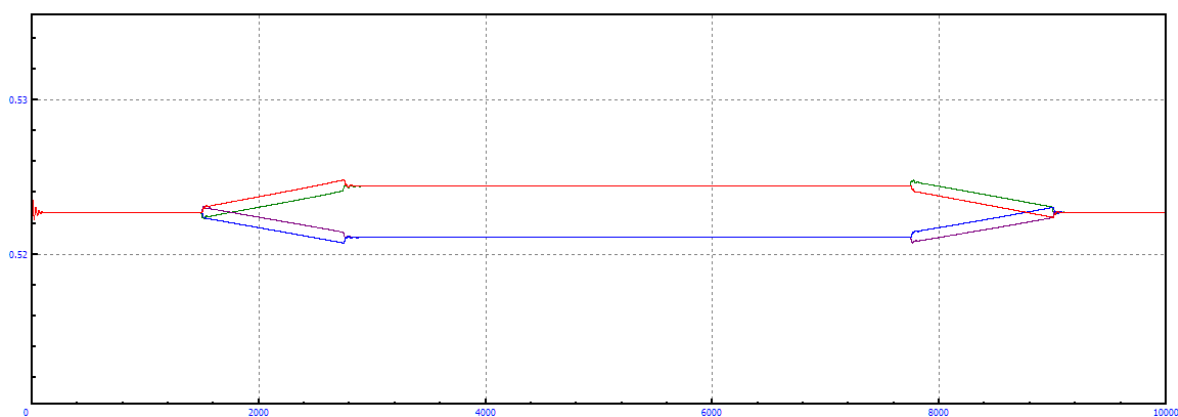


Figura A.701: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=40\text{m/s}$

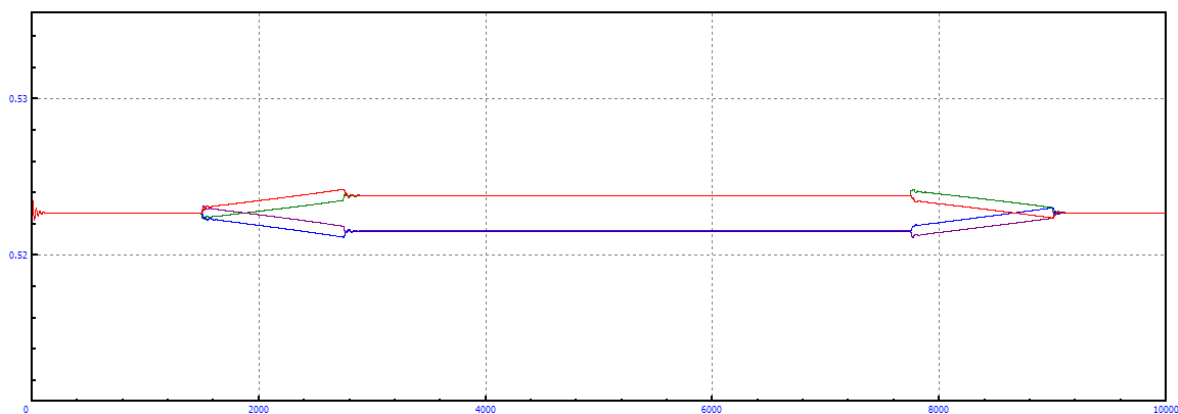


Figura A.702: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=45\text{m/s}$

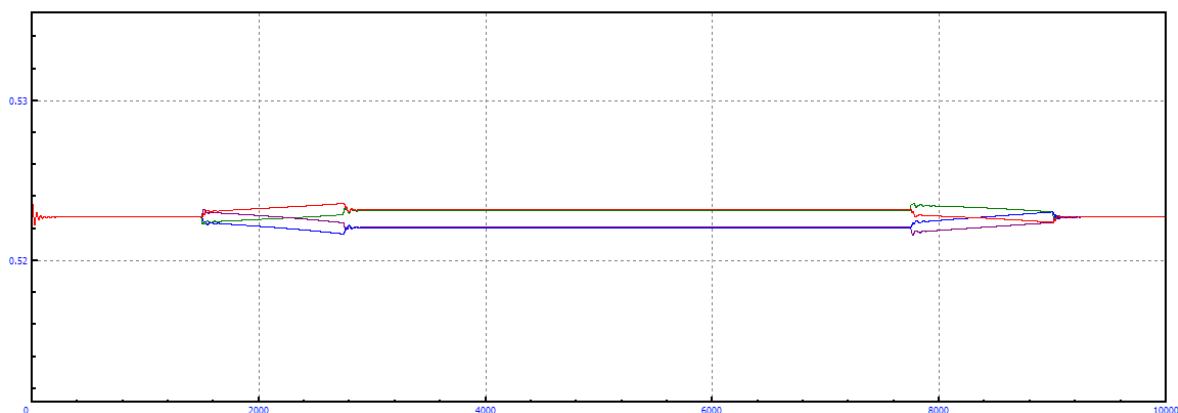


Figura A.703: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=50\text{m/s}$

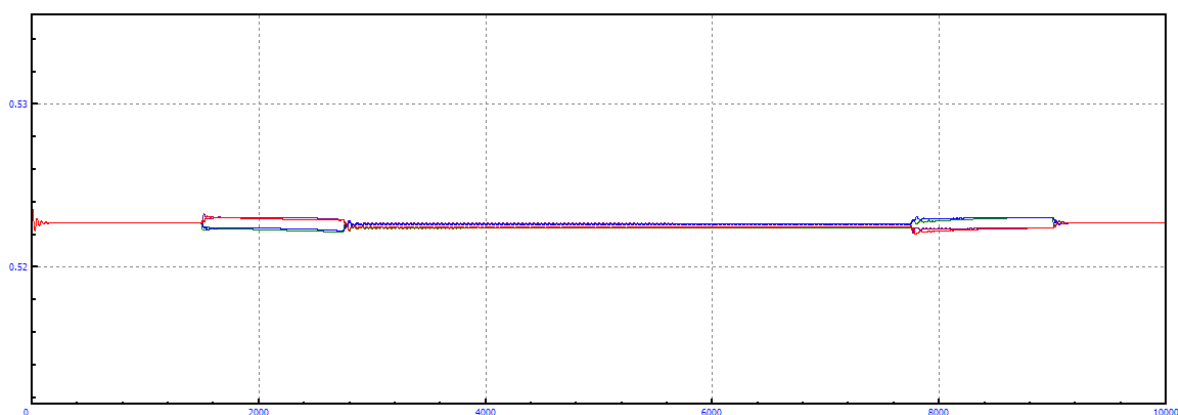


Figura A.704: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=55\text{m/s}$

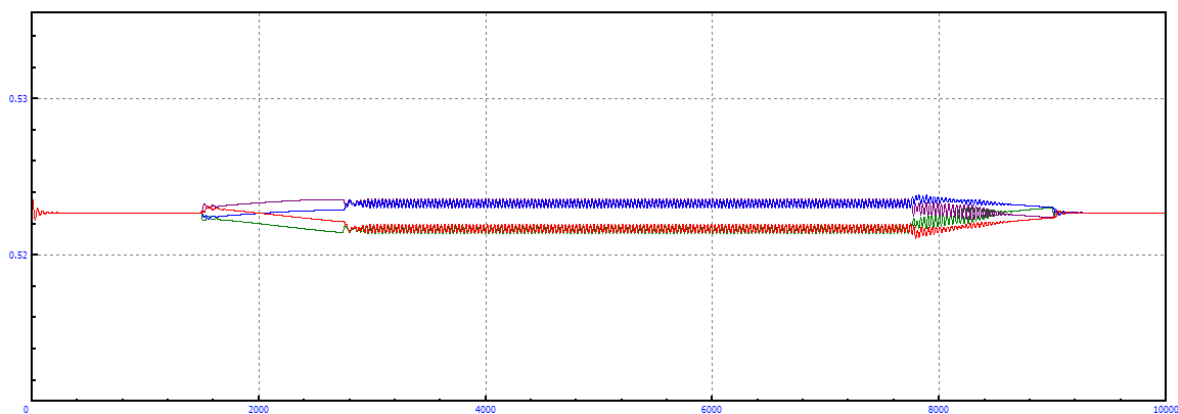


Figura A.705: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=60\text{m/s}$

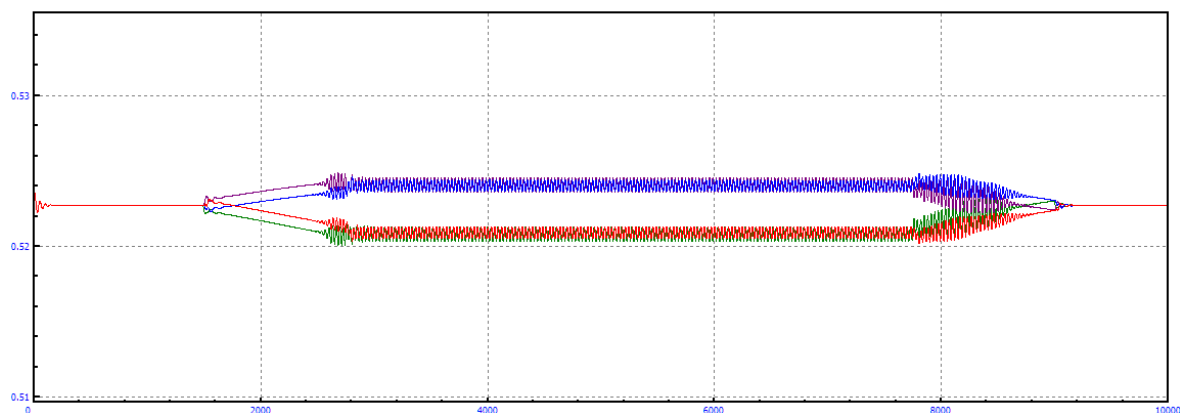


Figura A.706: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=65\text{m/s}$

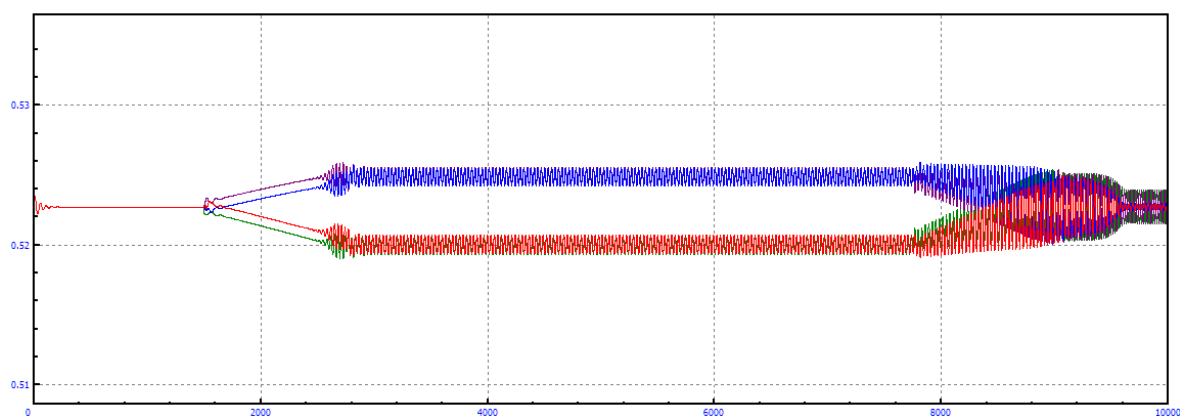


Figura A.707: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=70\text{m/s}$

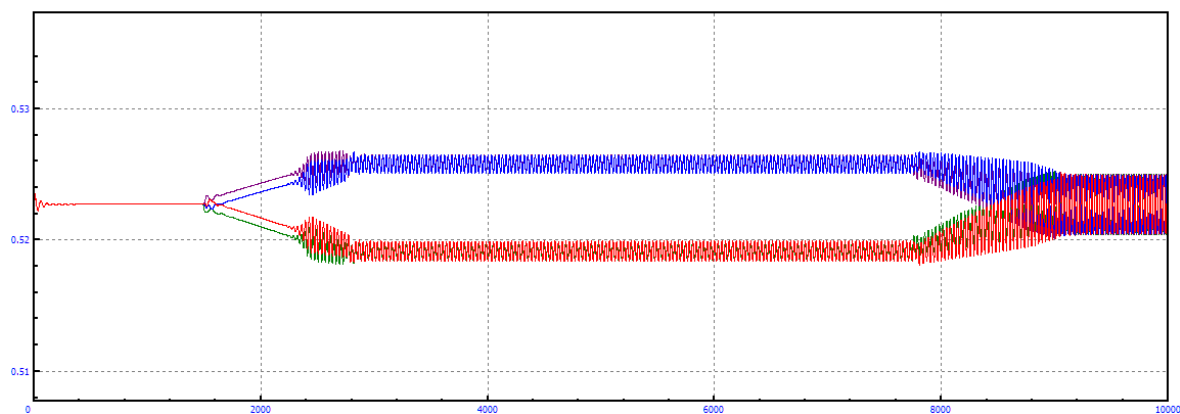


Figura A.708: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=75\text{m/s}$

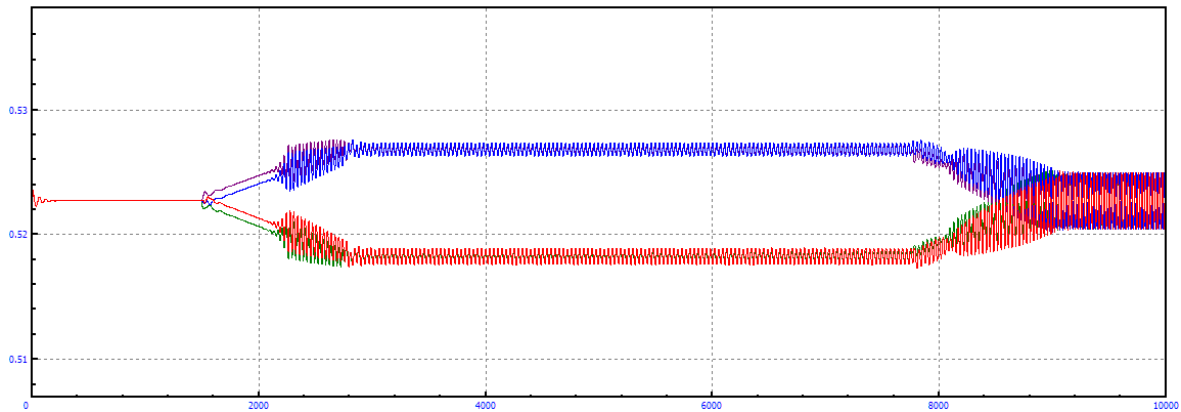


Figura A.709: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=80\text{m/s}$

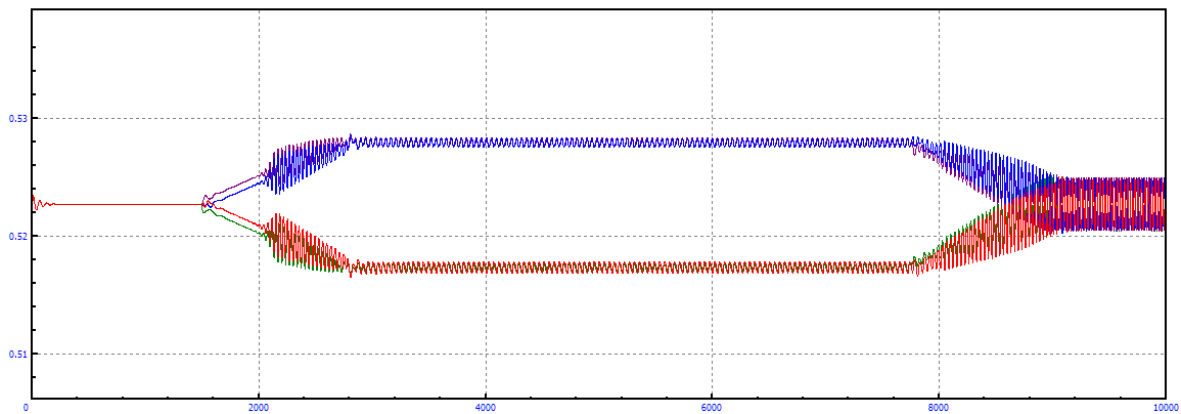


Figura A.710: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=85\text{m/s}$

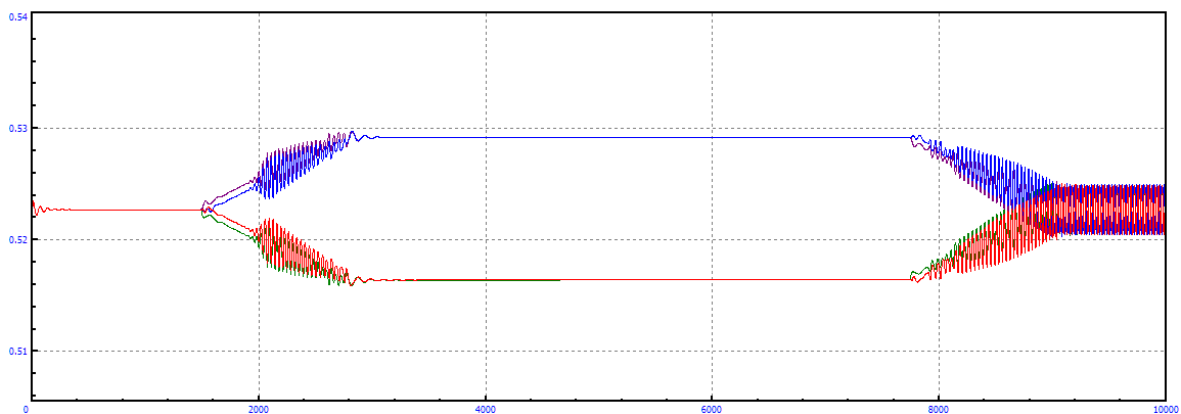


Figura A.711: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria=+100% y $V=90\text{m/s}$

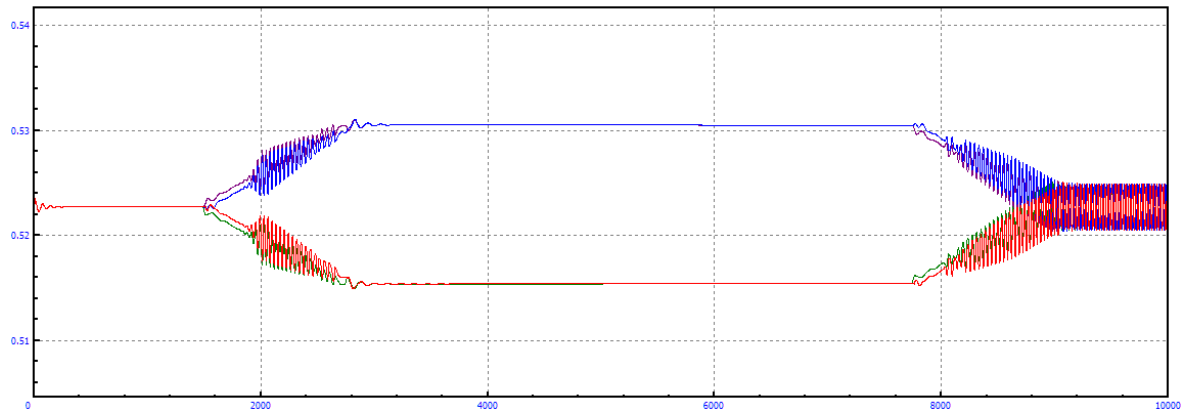


Figura A.712: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=95\text{m/s}$

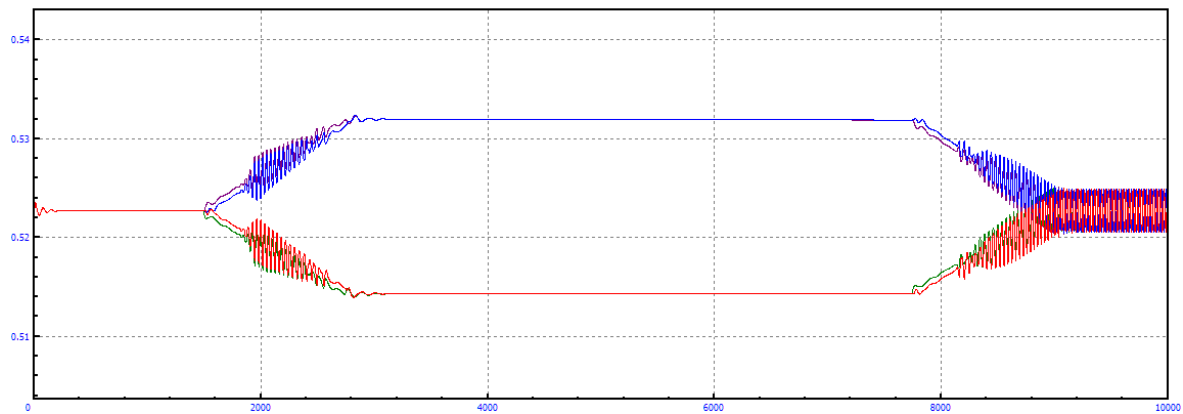


Figura A.713: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=100\text{m/s}$

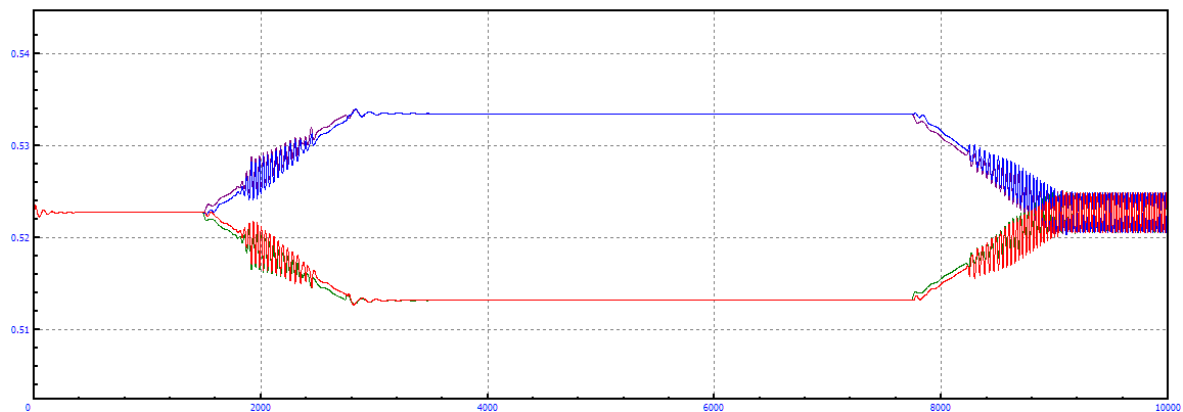


Figura A.714: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=105\text{m/s}$

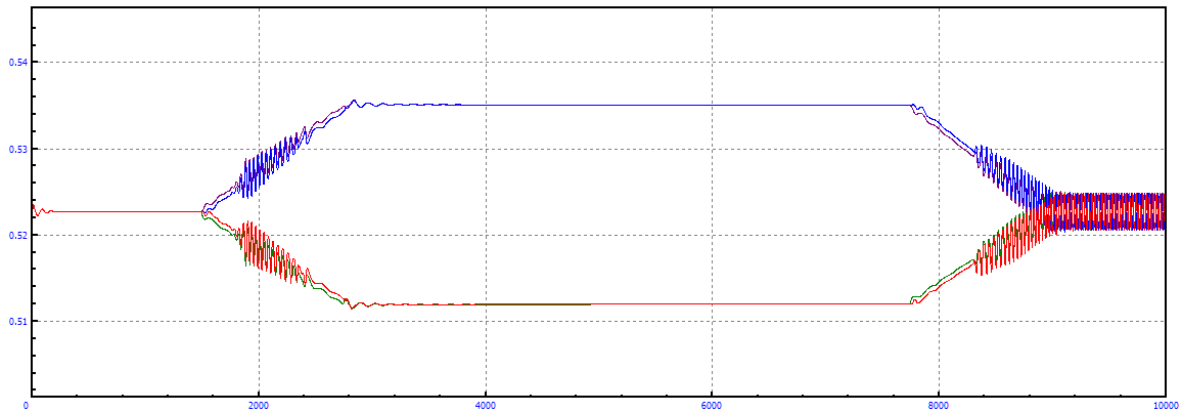


Figura A.715: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=110\text{m/s}$

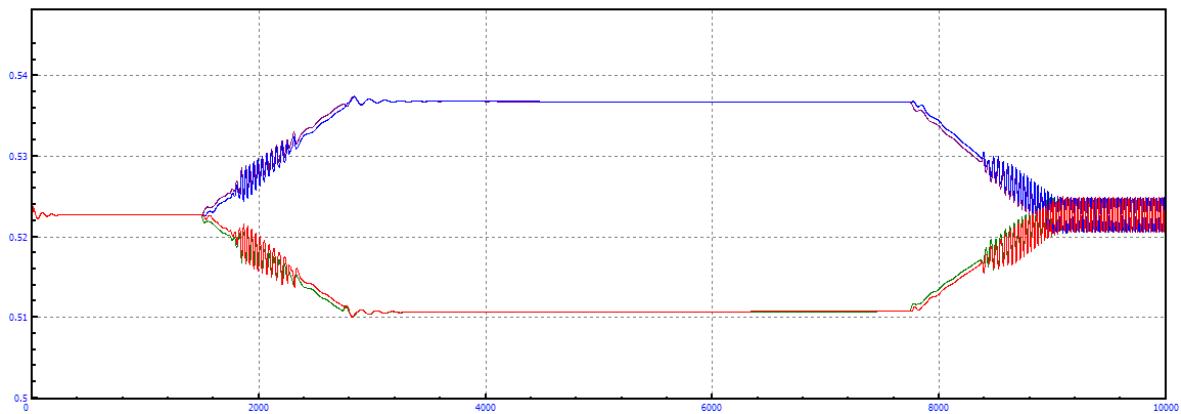


Figura A.716: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=115\text{m/s}$

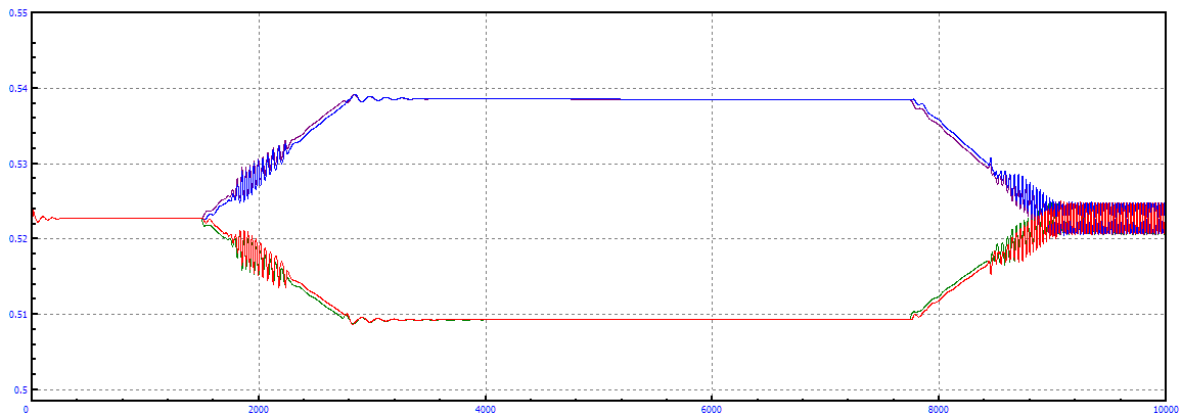


Figura A.717: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=120\text{m/s}$

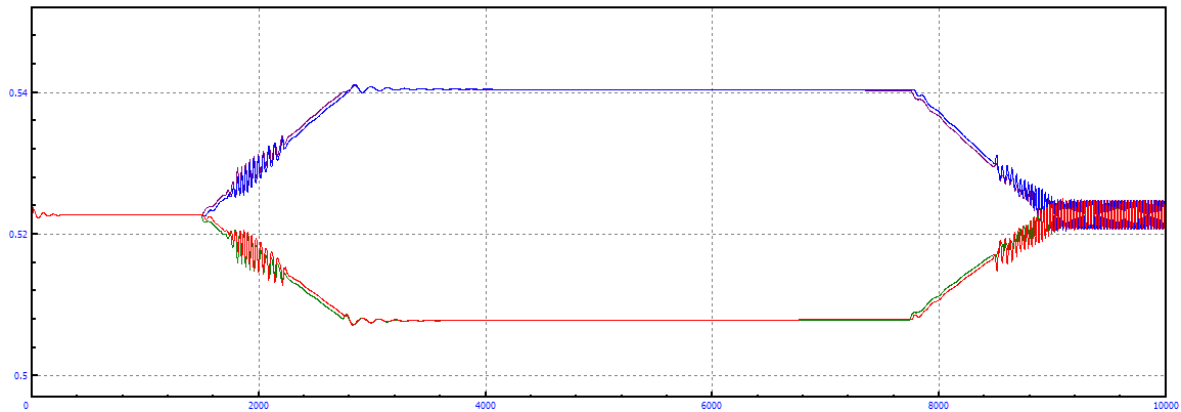


Figura A.718: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=125\text{m/s}$

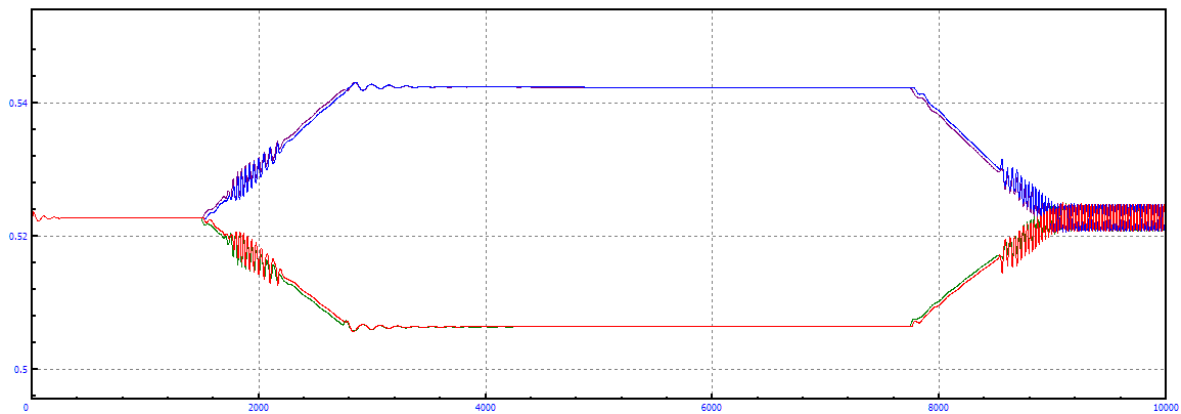


Figura A.719: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=130\text{m/s}$

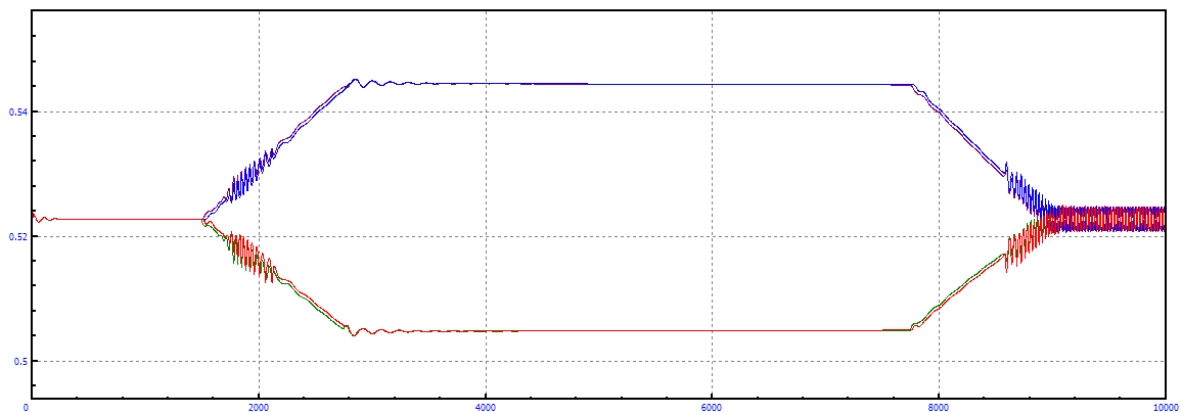


Figura A.720: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=135\text{m/s}$

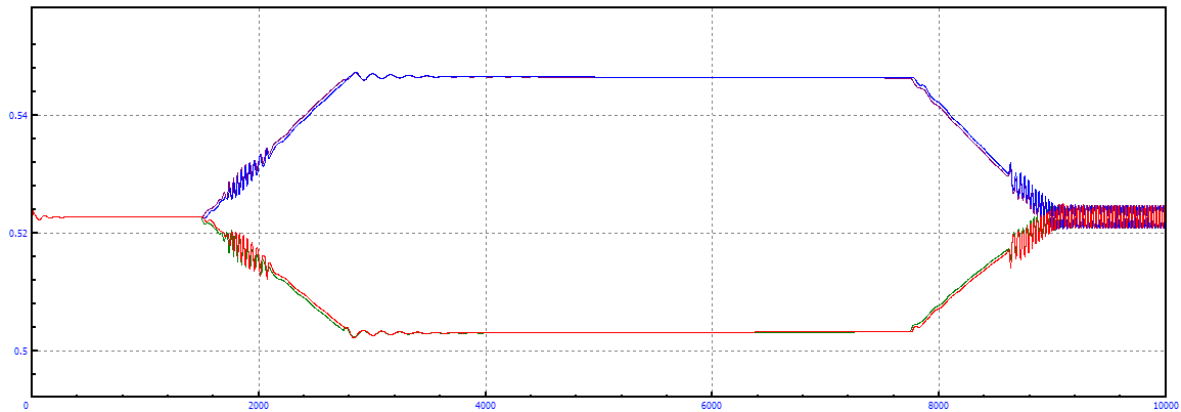


Figura A.721: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=140\text{m/s}$

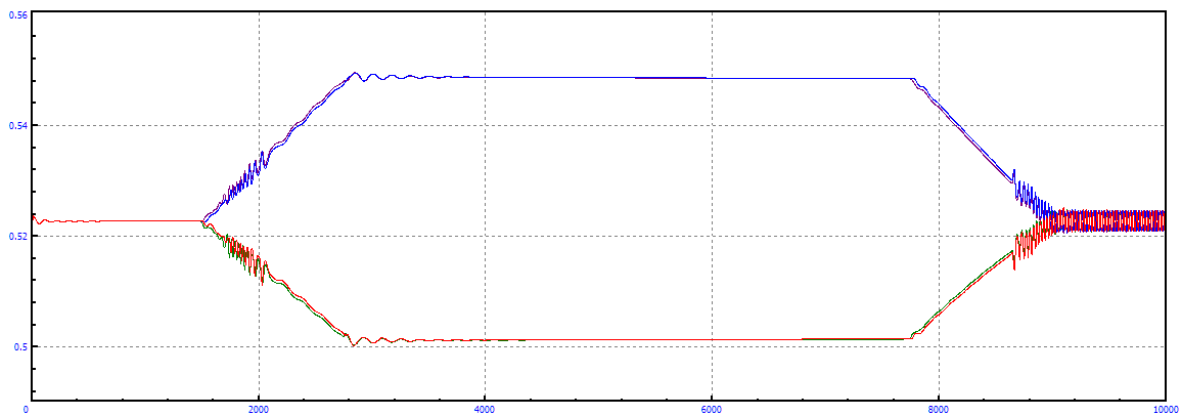


Figura A.722: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=145\text{m/s}$

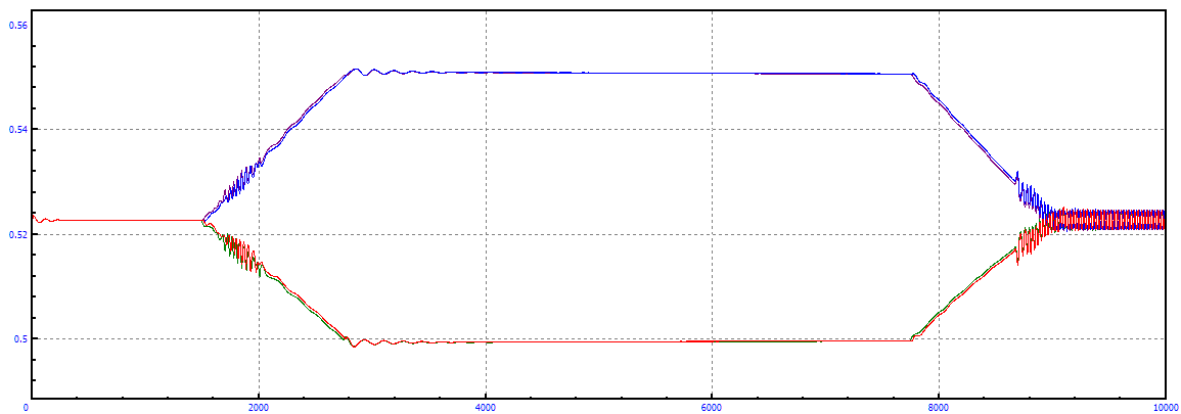


Figura A.723: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=150\text{m/s}$

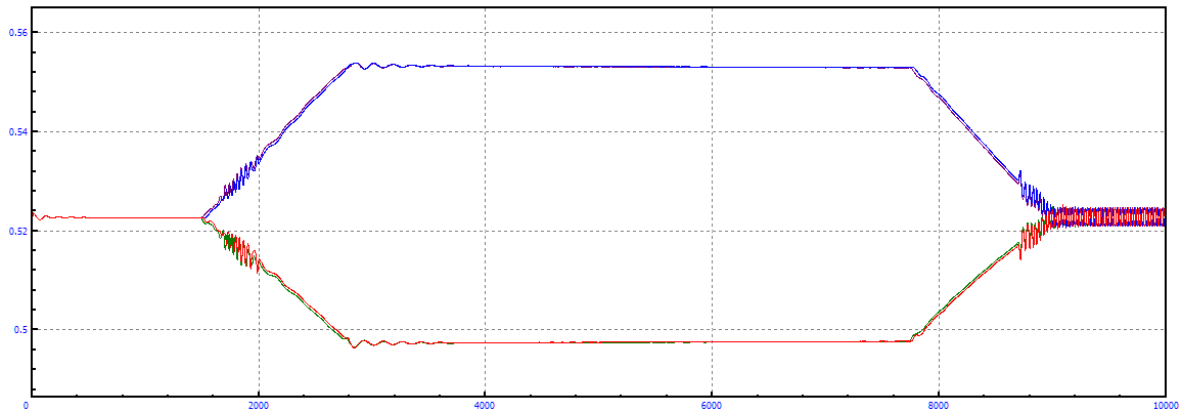


Figura A.724: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=155\text{m/s}$

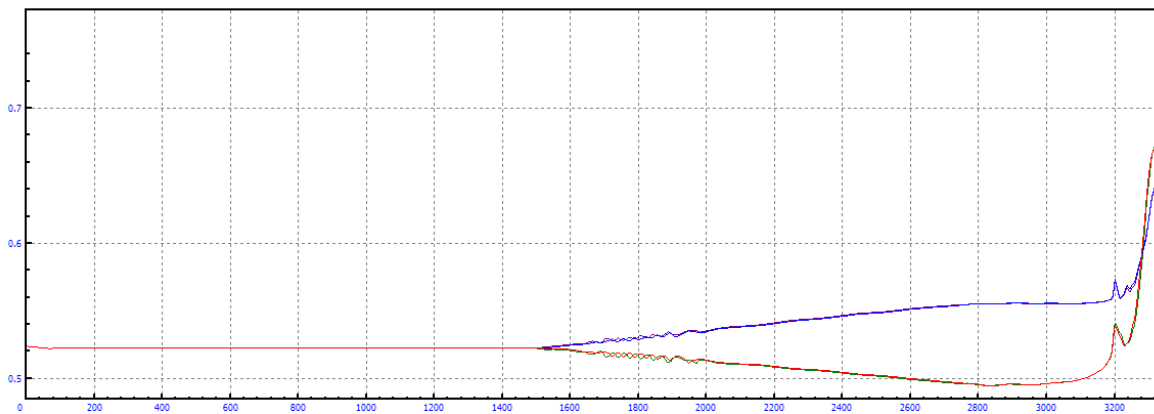


Figura A.725: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, amortiguación secundaria $=+100\%$ y $V=160\text{m/s}$

C. EXPERIMENTO 3

C.1 EJE Z

C.1.1 RADIO 1KM

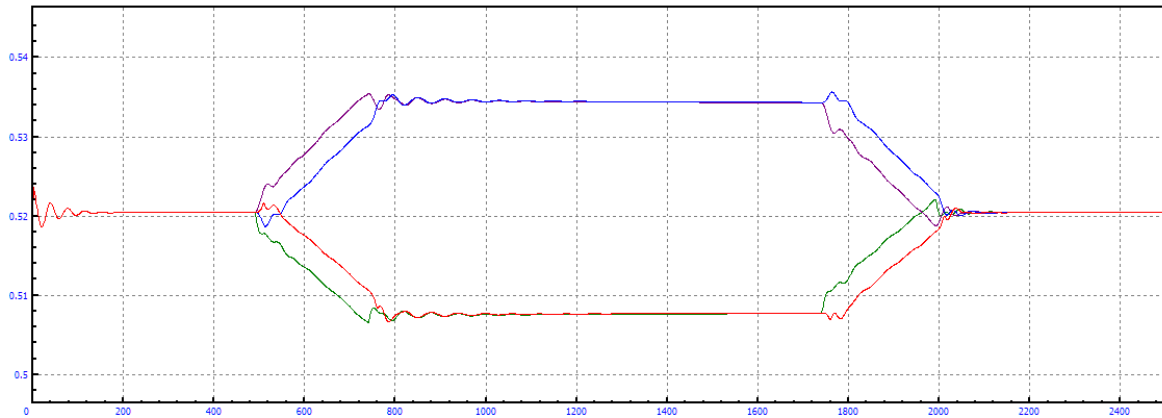


Figura A.726: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Z=0\text{m}$ (valor por defecto) y $V=40\text{m/s}$

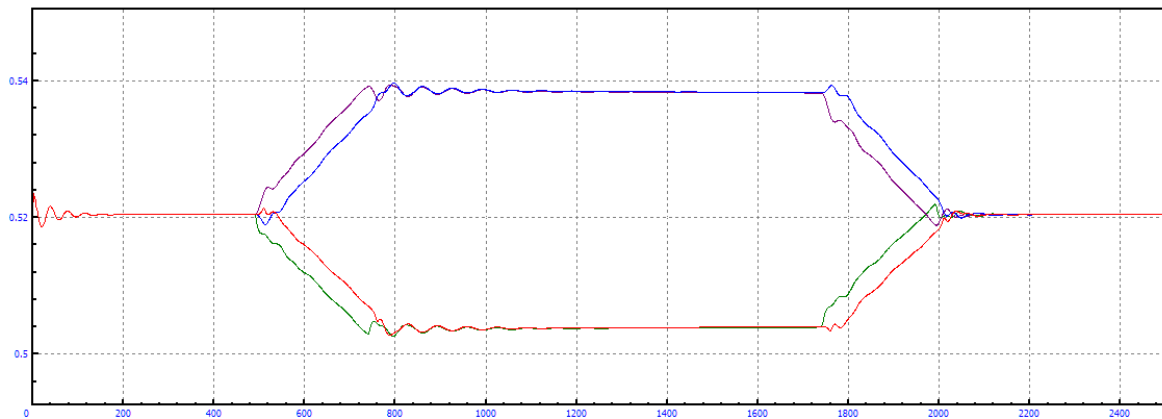


Figura A.727: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Z=+0.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

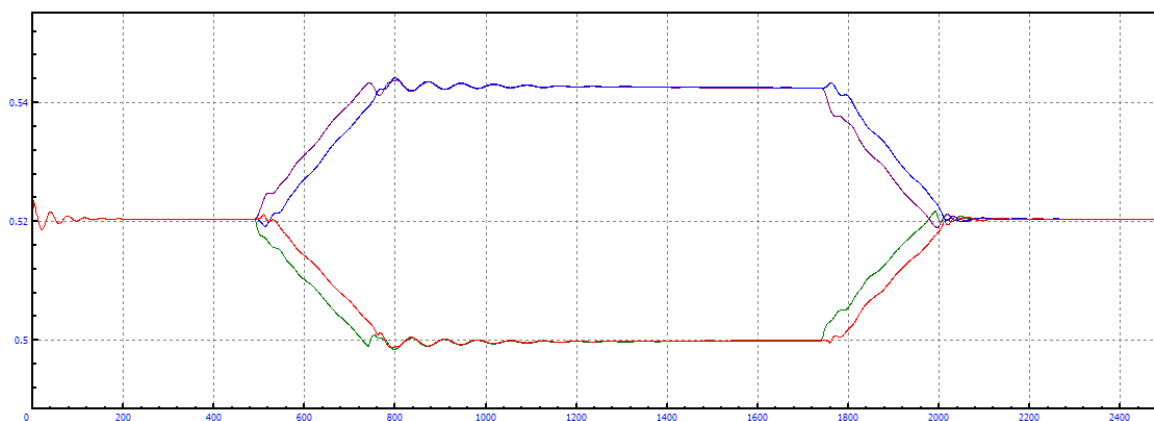


Figura A.728: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Z=+0.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

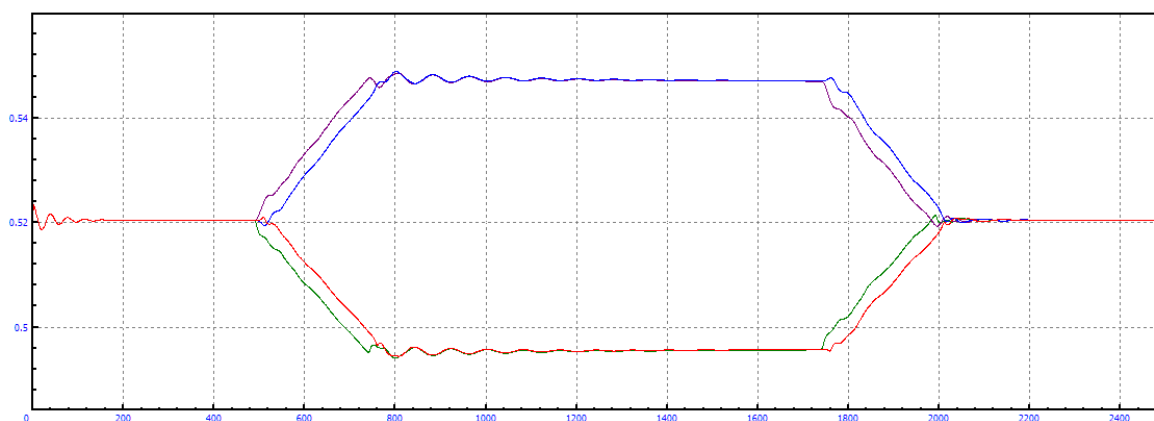


Figura A.729: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Z=+0.75\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

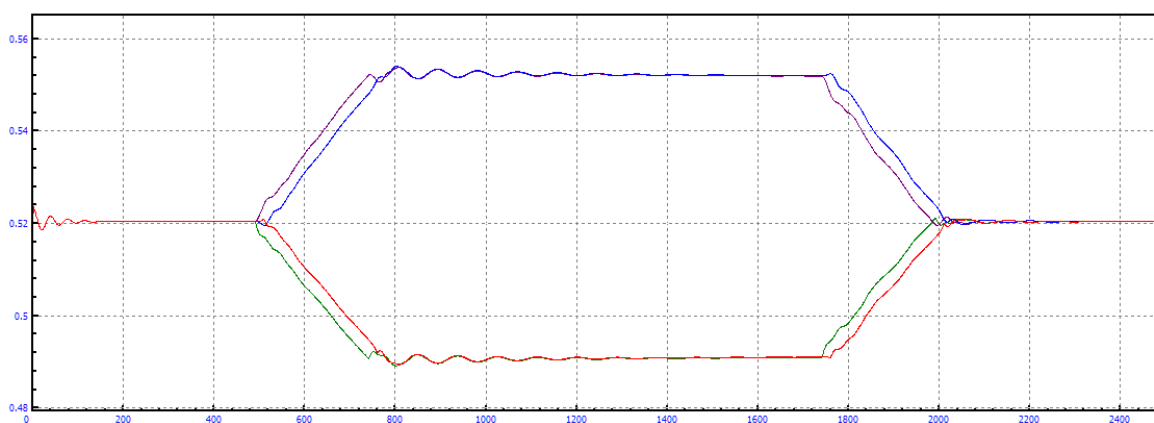


Figura A.730: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Z=+1\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

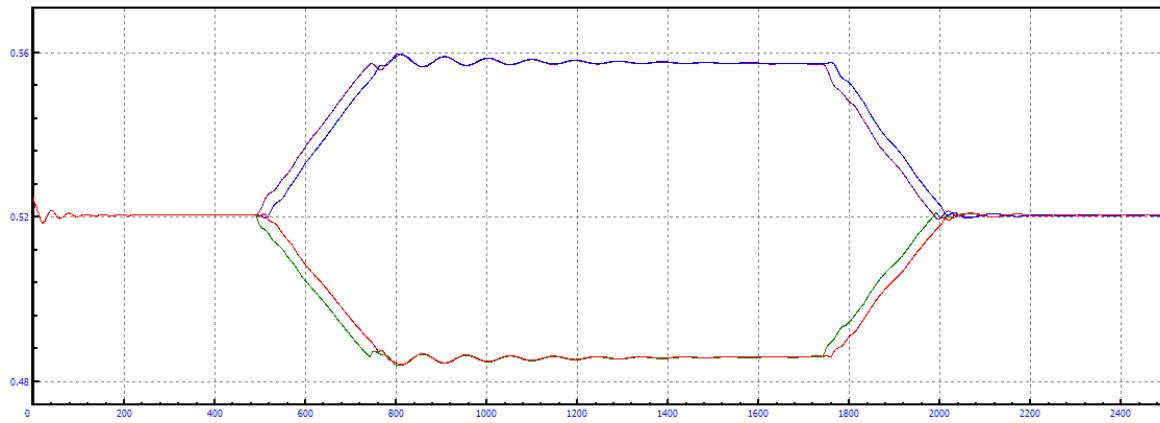


Figura A.731: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Z=+1.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

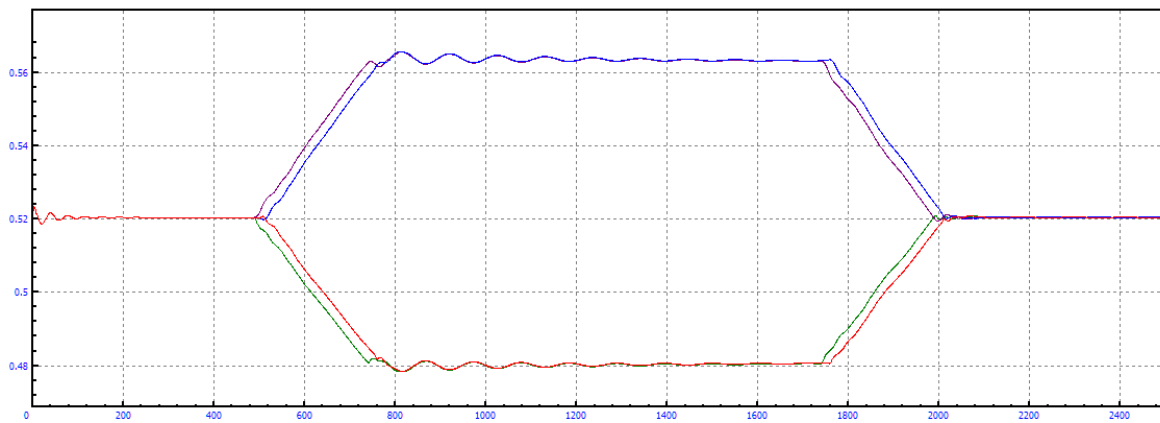


Figura A.732: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Z=+1.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

C.1.2 RADIO 2KM

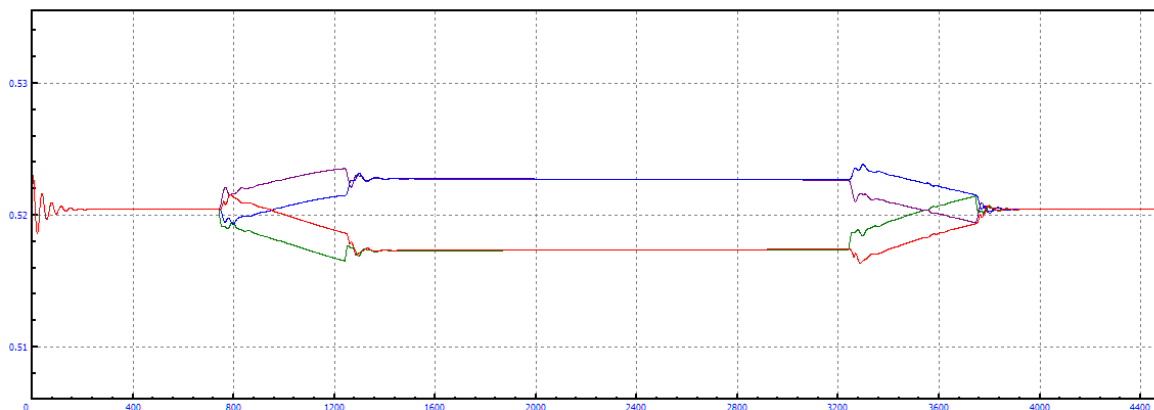


Figura A.733: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Z=0\text{m}$ (valor por defecto) y $V=40\text{m/s}$

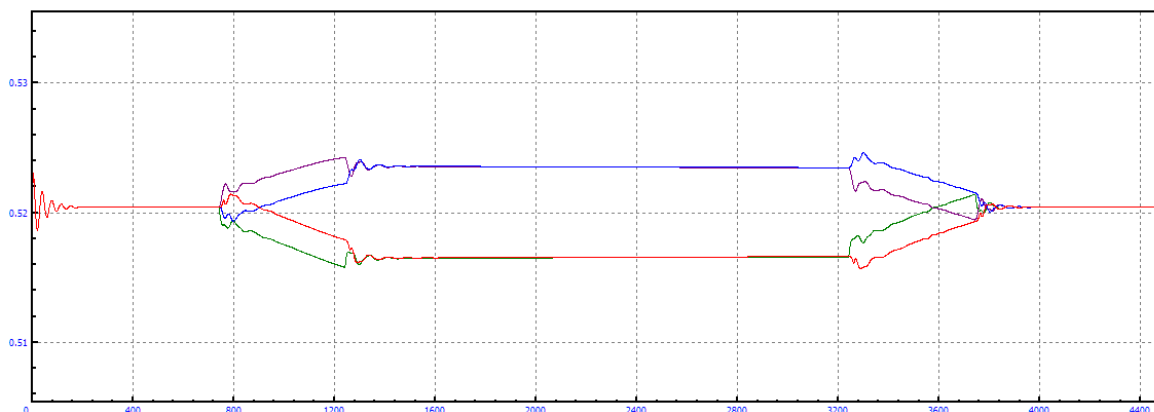


Figura A.734: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Z=+0.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

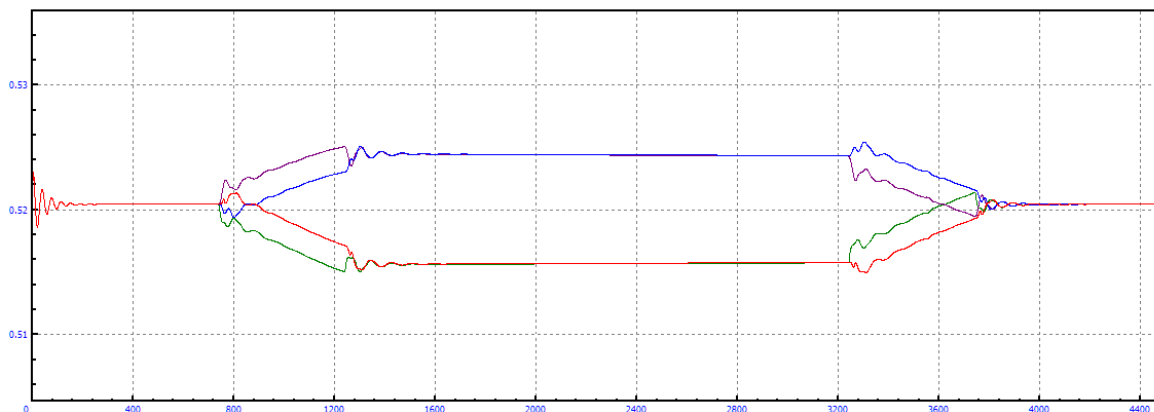


Figura A.735: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Z=+0.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

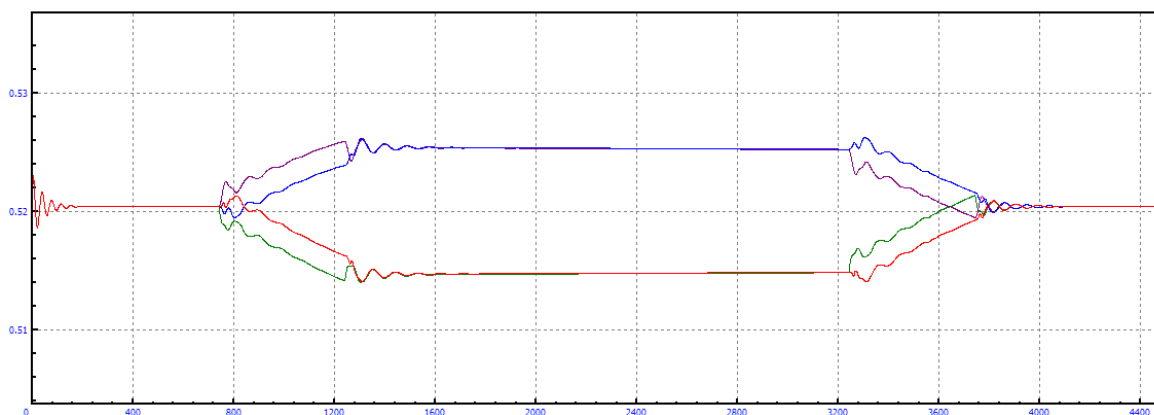


Figura A.736: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Z=+0.75\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

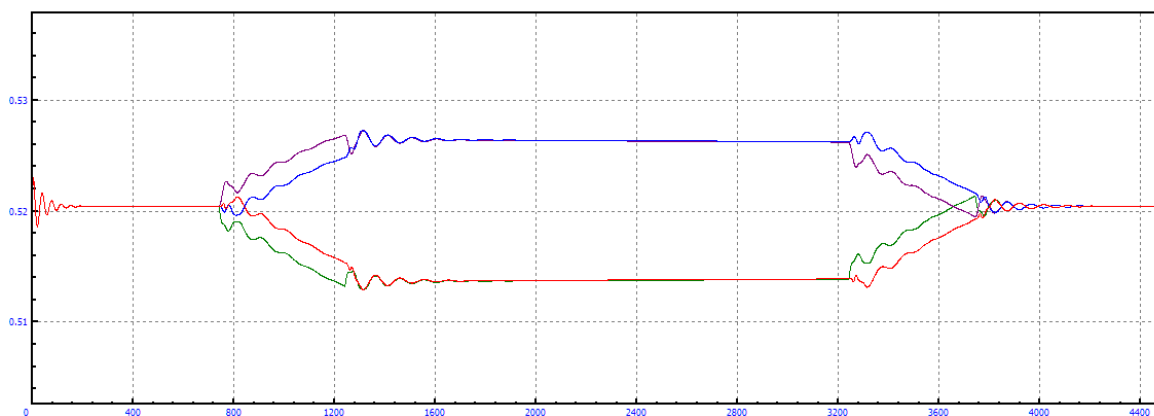


Figura A.737: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Z=+1\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

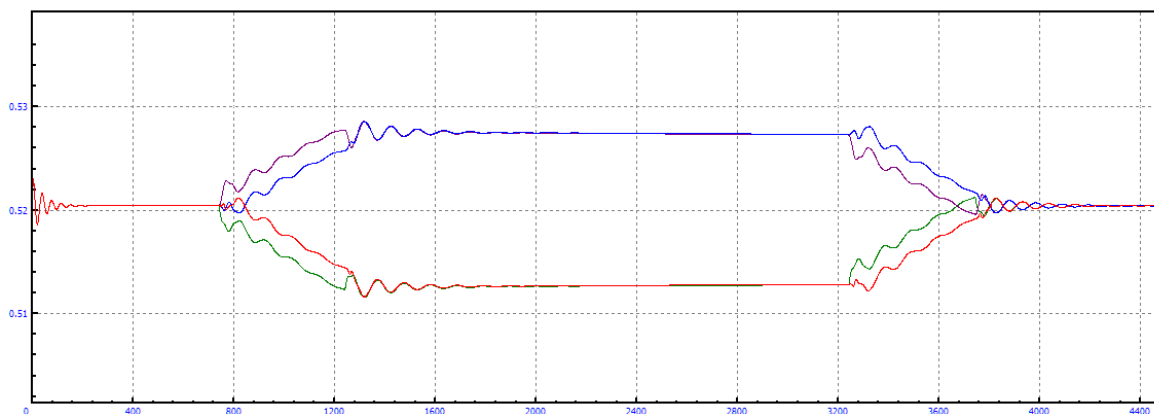


Figura A.738: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Z=+1.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

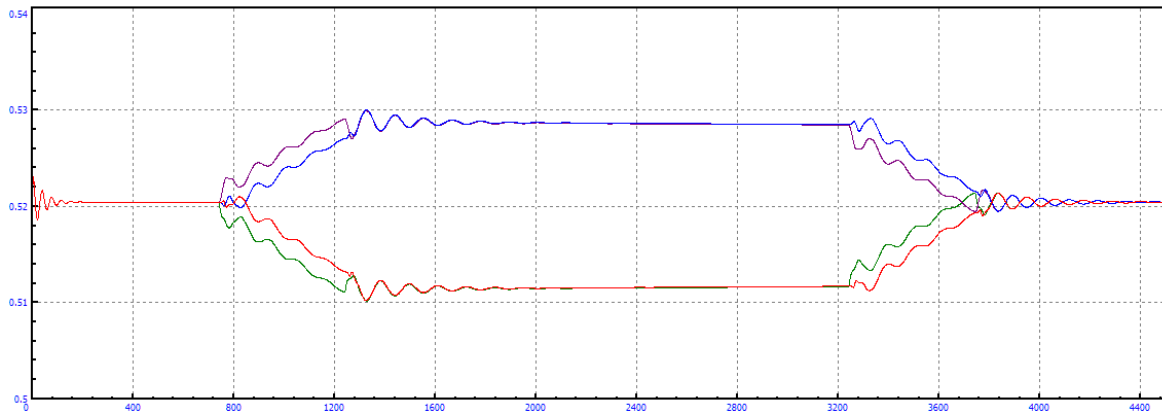


Figura A.739: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Z=+1.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

C.1.3 RADIO 5KM

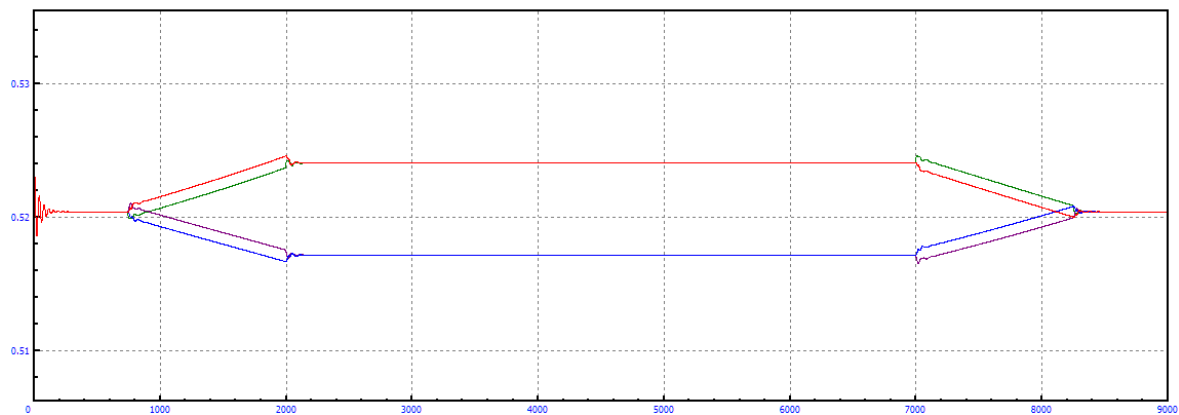


Figura A.740: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Z=0\text{m}$ (valor por defecto) y $V=40\text{m/s}$

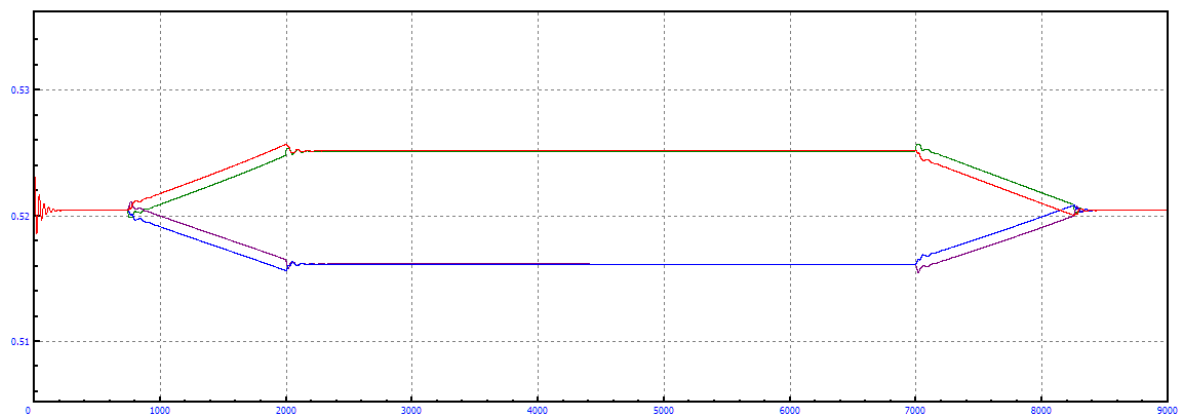


Figura A.741: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Z=+0.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

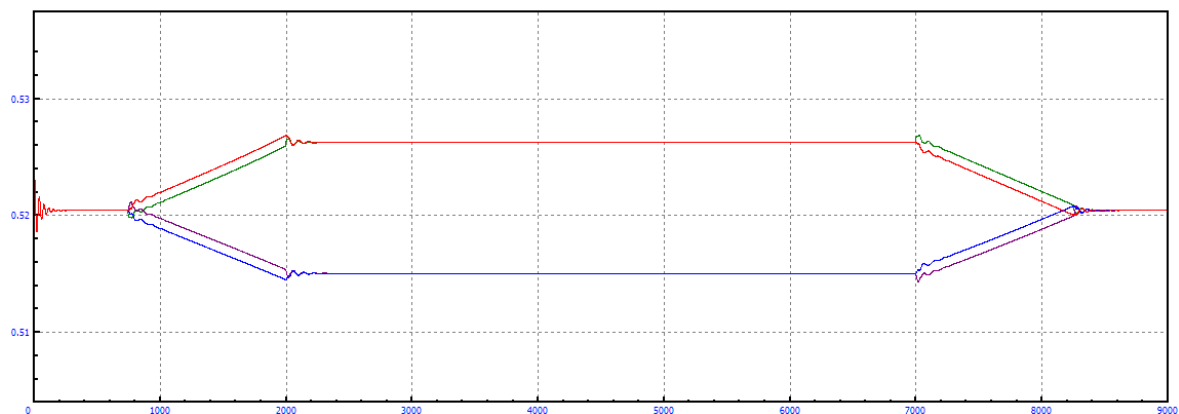


Figura A.742: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Z=+0.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

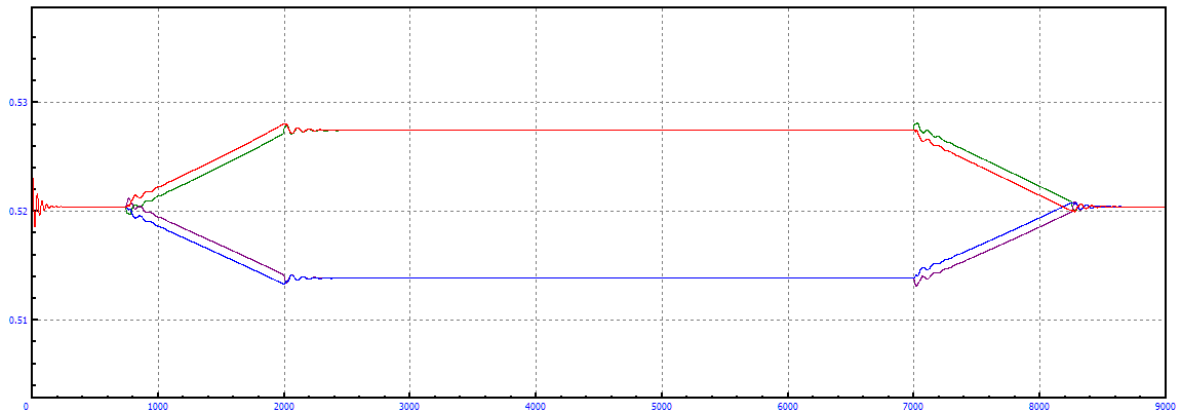


Figura A.743: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Z=+0.75\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

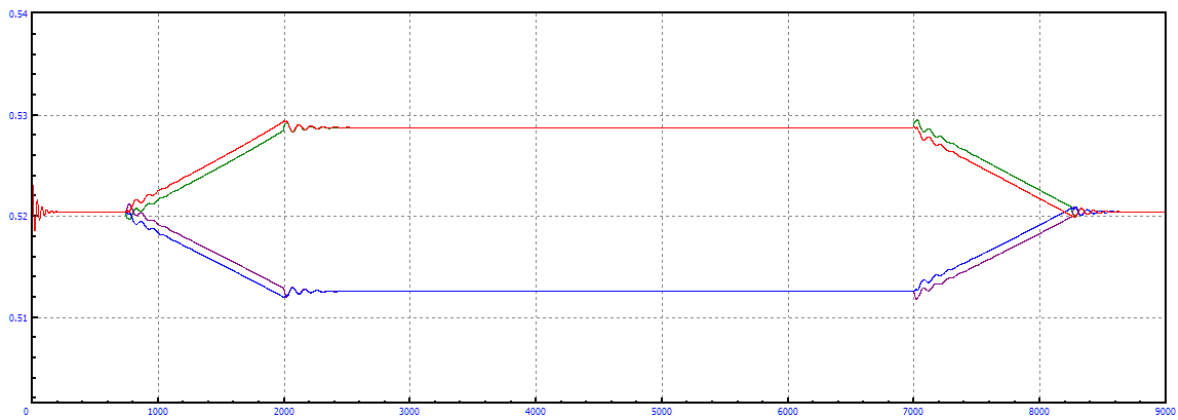


Figura A.744: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Z=+1\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

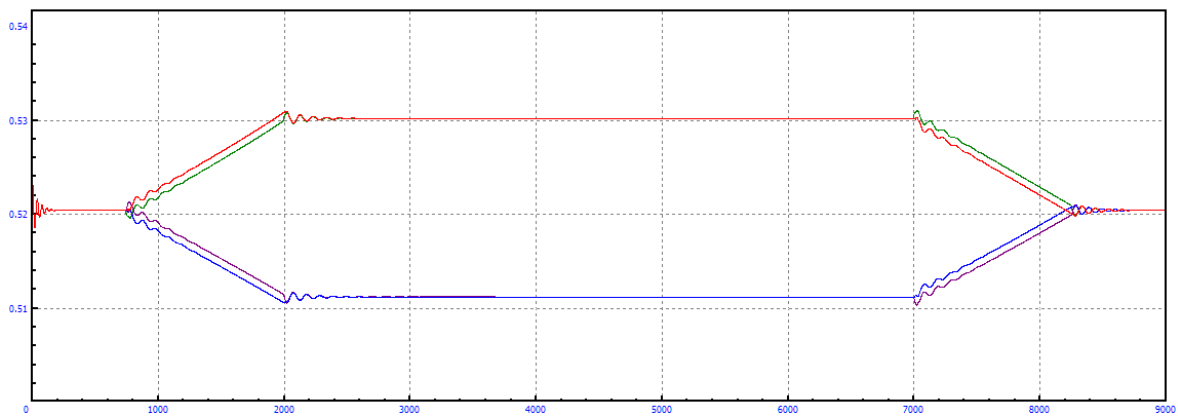


Figura A.745: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Z=+1.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

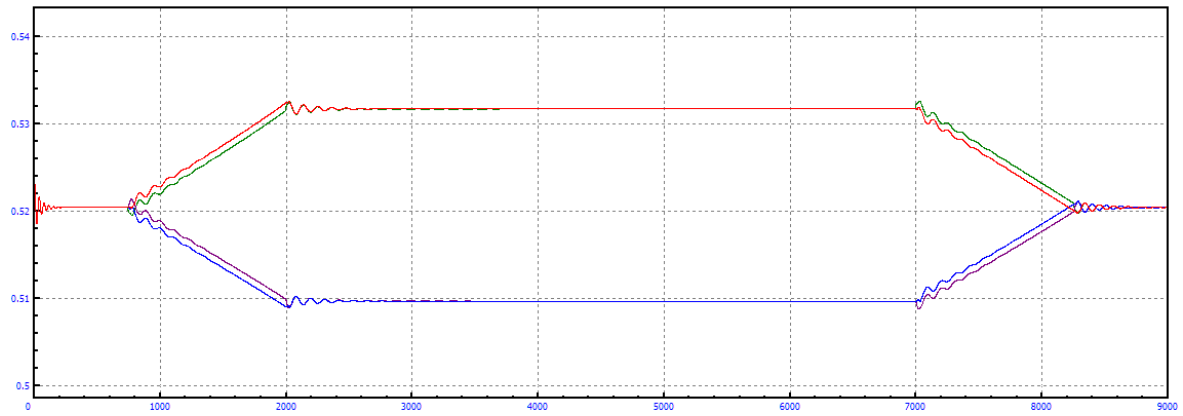


Figura A.746: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Z=+1.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

C.2 EJE Y

C.2.1 RADIO 1KM

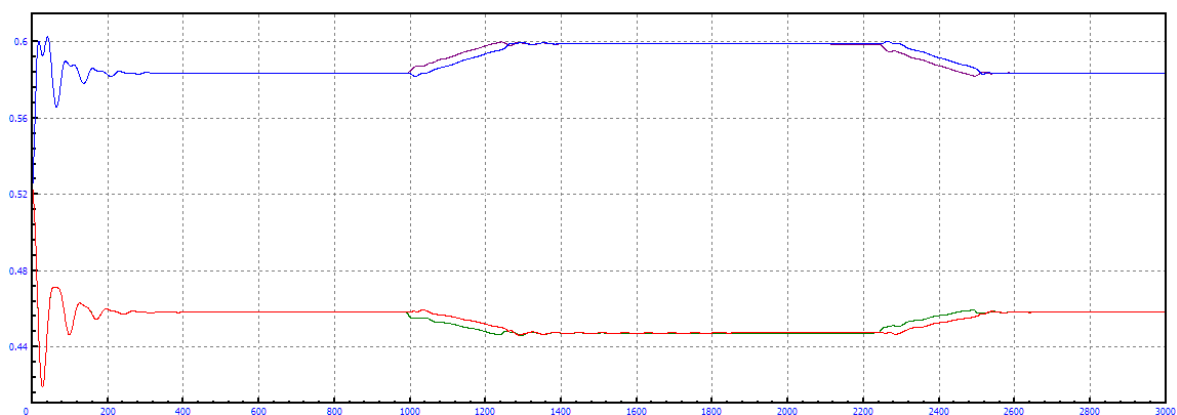


Figura A.747: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Y=+0.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

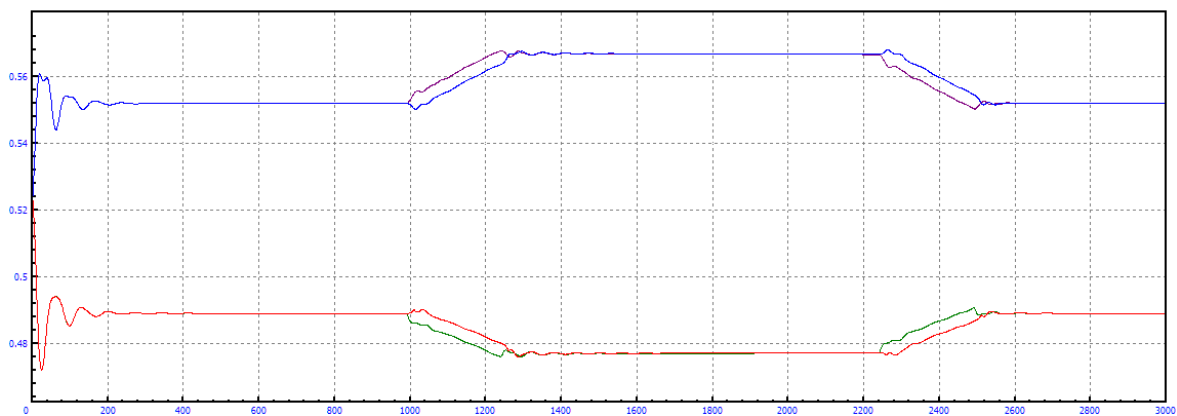


Figura A.748: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Y=+0.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

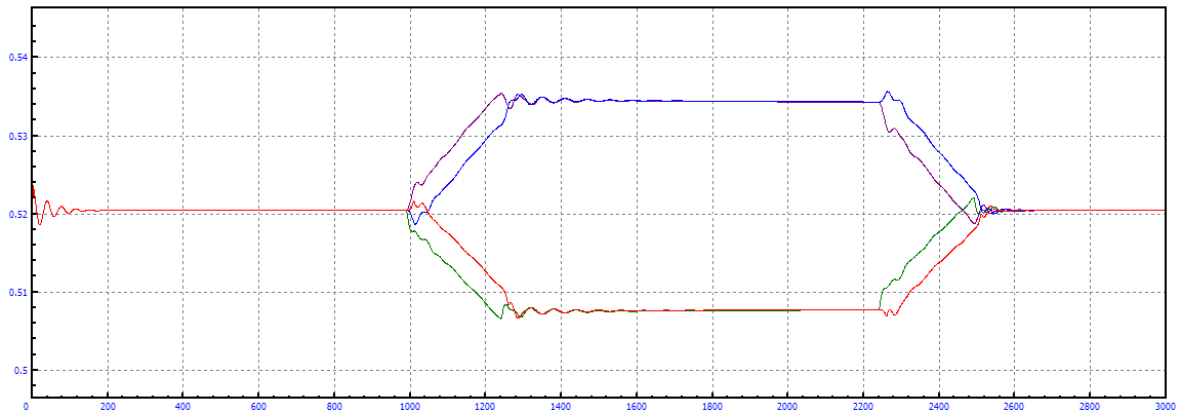


Figura A.749: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Y=0\text{m}$ (valor por defecto) y $V=40\text{m/s}$

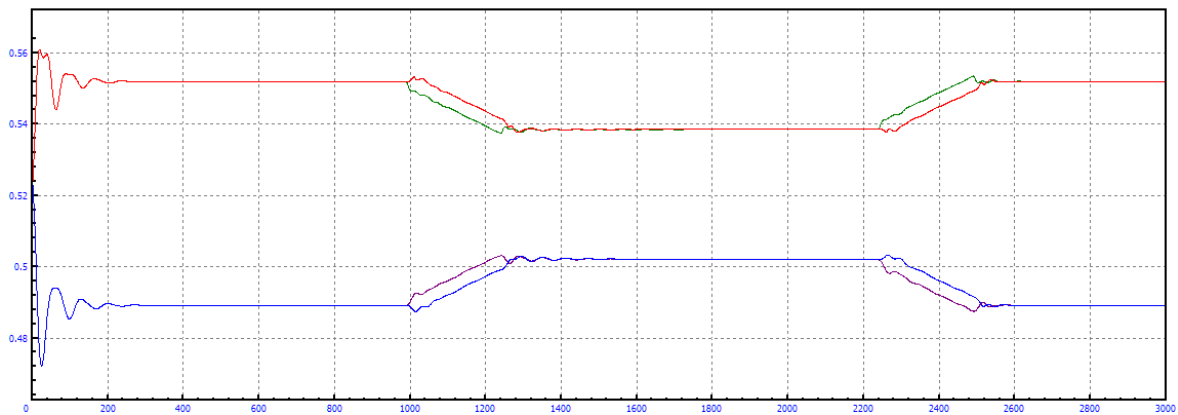


Figura A.750: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Y=-0.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

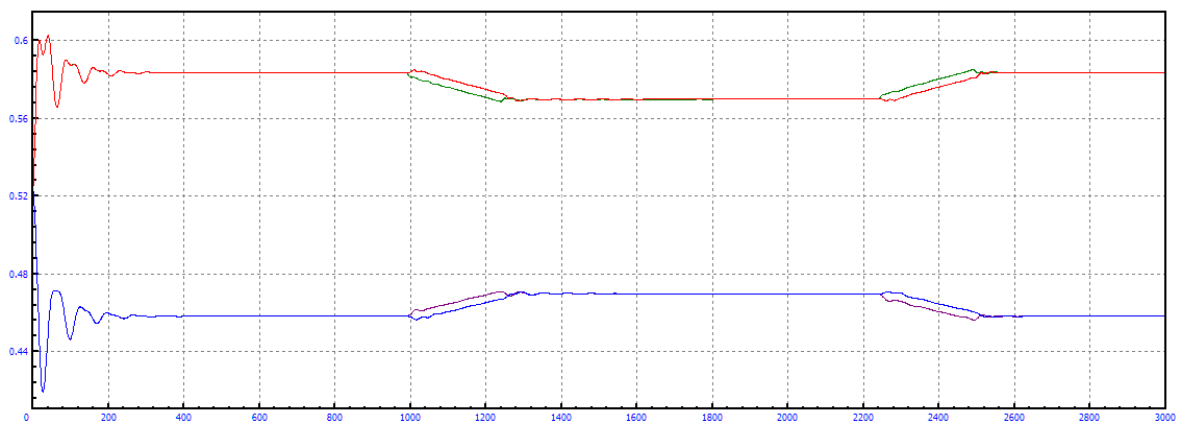


Figura A.751: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $Y=-0.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

C.2.2 RADIO 2KM

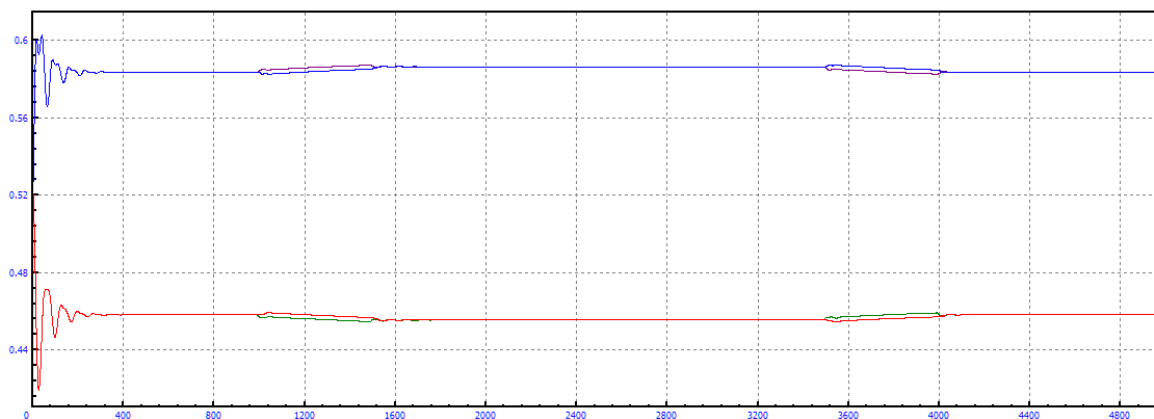


Figura A.752: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Y=+0.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

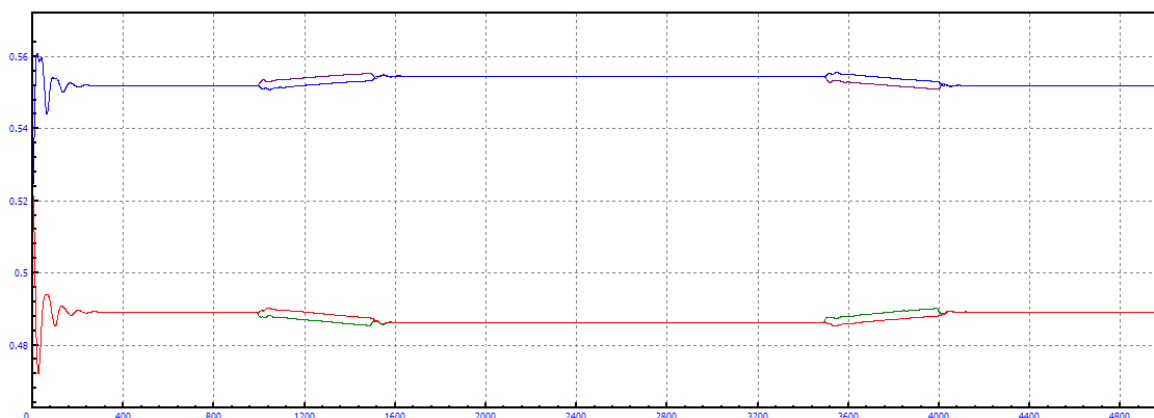


Figura A.753: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Y=+0.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

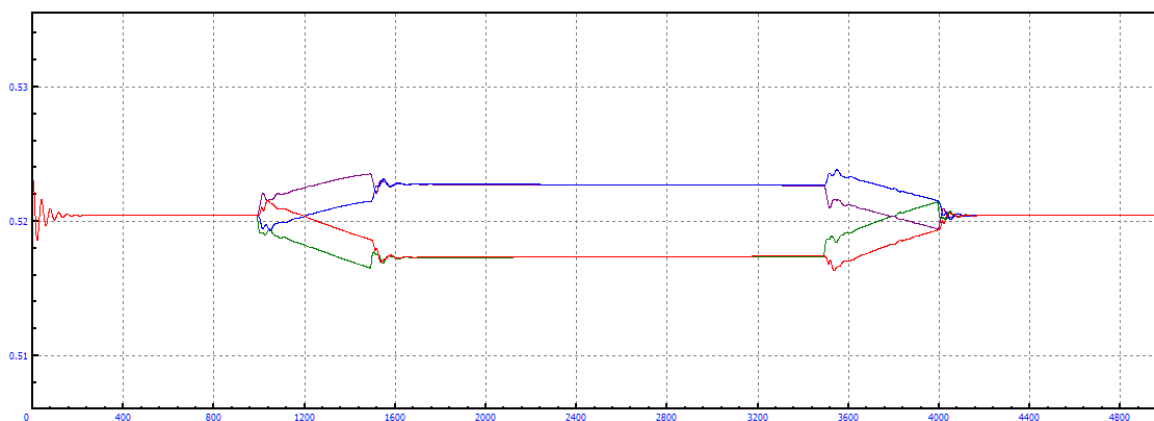


Figura A.754: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Y=0\text{m}$ (valor por defecto) y $V=40\text{m/s}$

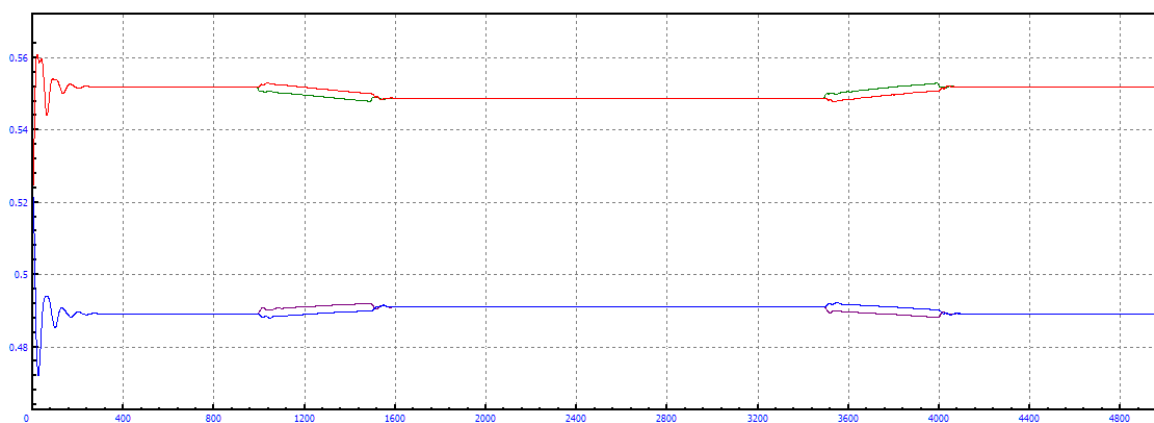


Figura A.755: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Y=-0.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

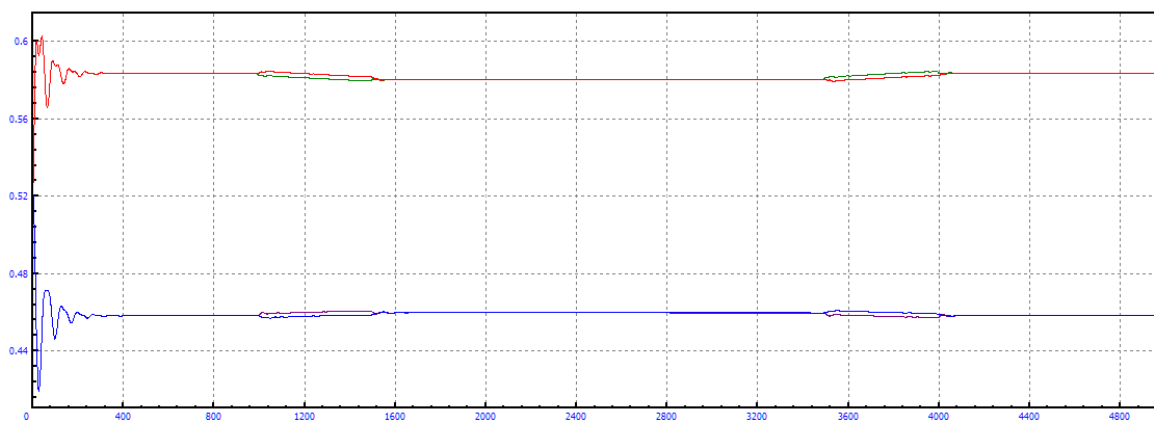


Figura A.756: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $Y=-0.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

C.2.3 RADIO 5KM

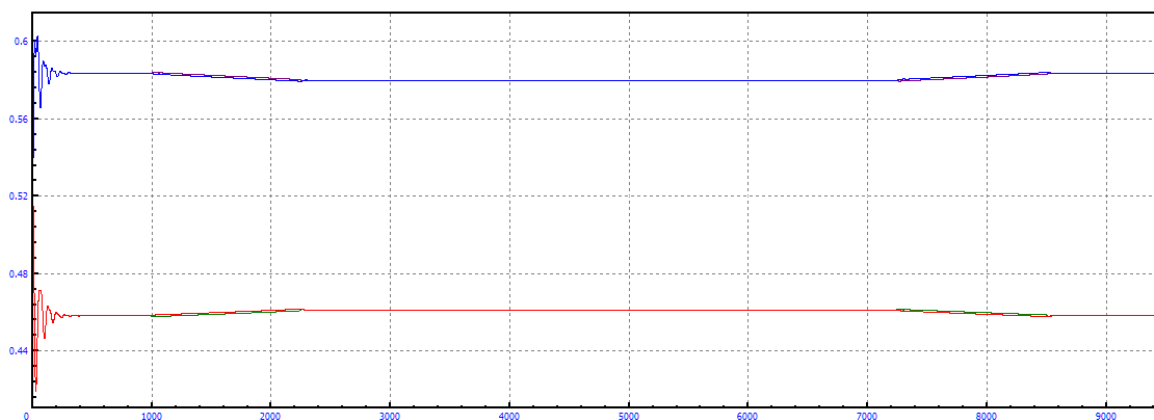


Figura A.757: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Y=+0.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

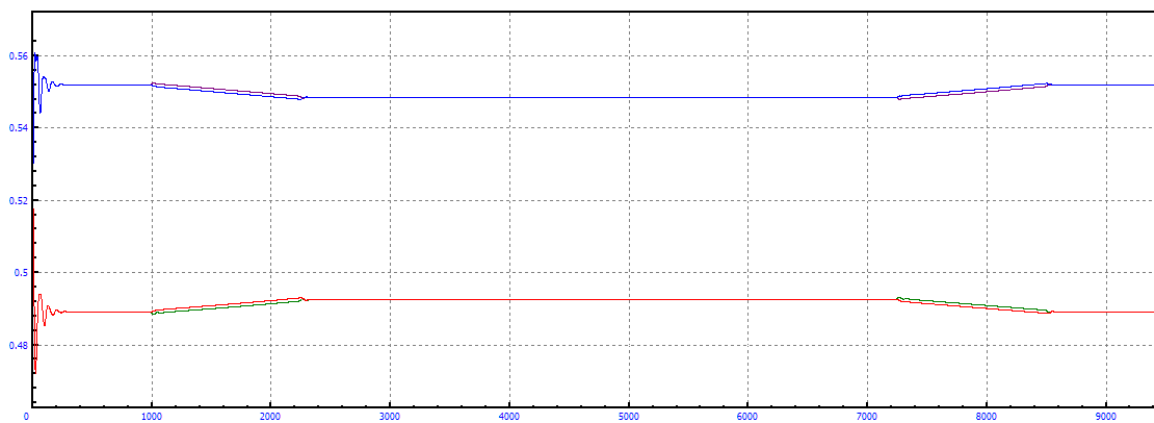


Figura A.758: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Y=+0.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

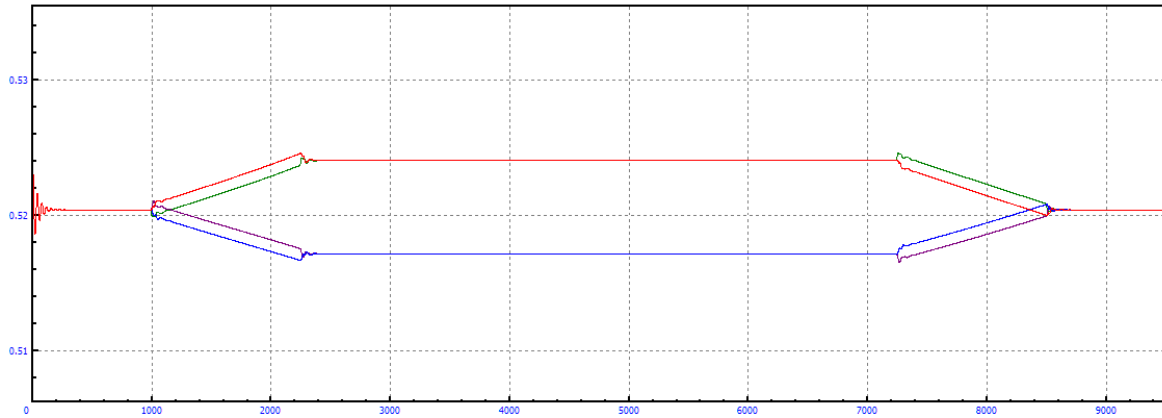


Figura A.759: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Y=0\text{m}$ (valor por defecto) y $V=40\text{m/s}$

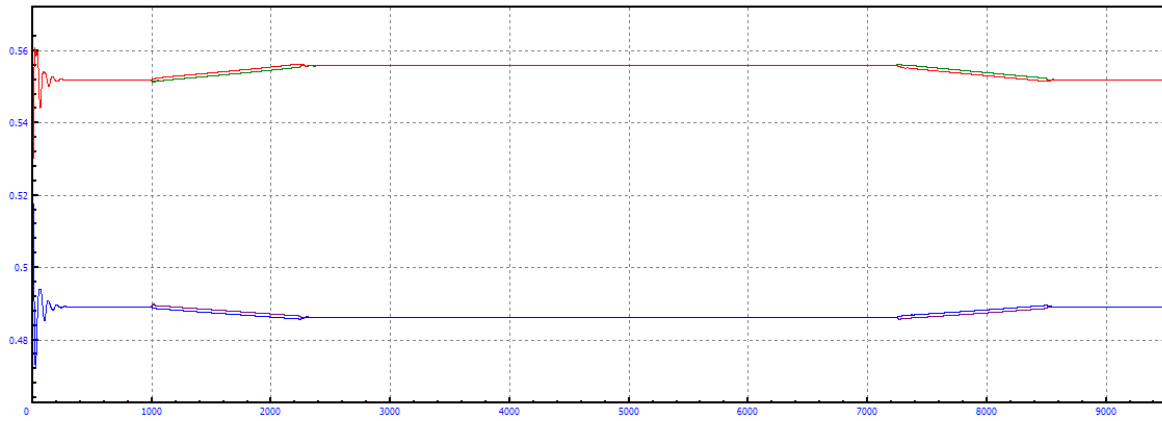


Figura A.760: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Y=-0.25\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

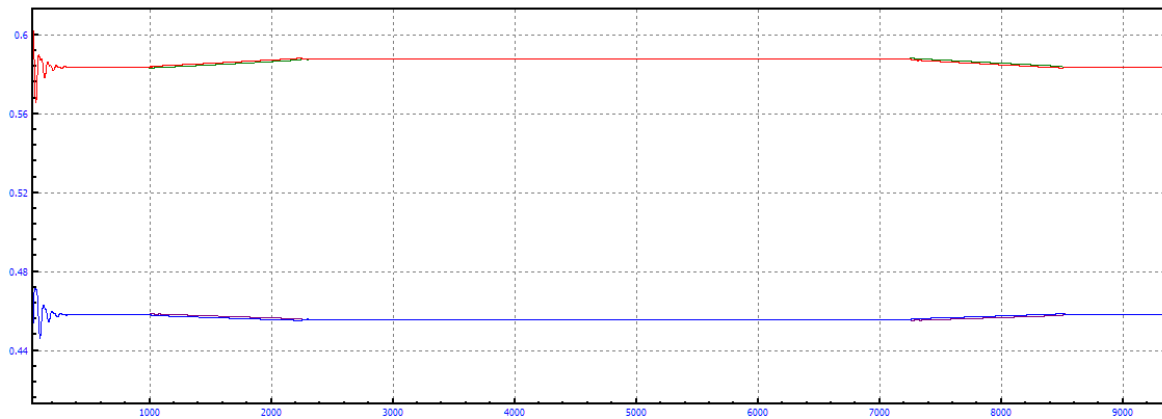


Figura A.761: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $Y=-0.5\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

C.3 EJE X

C.3.1 RADIO 1KM

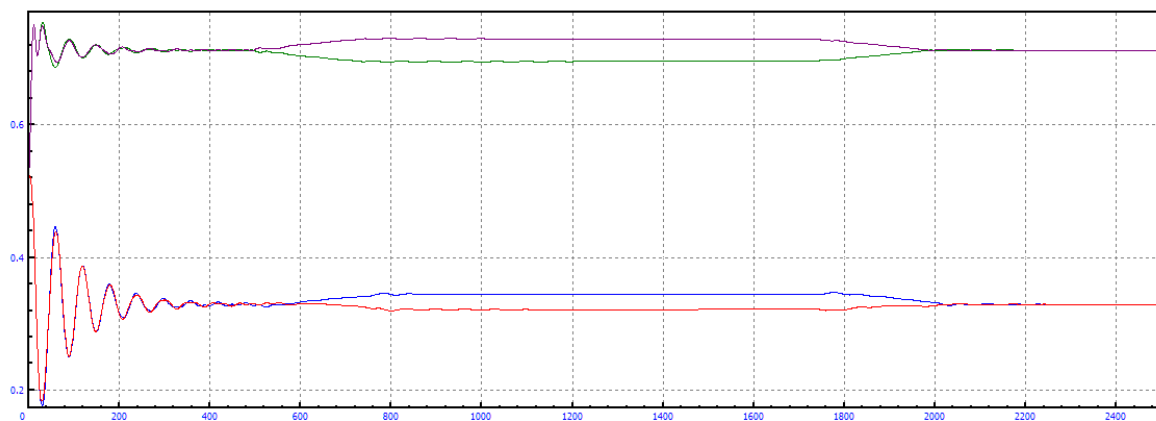


Figura A.762: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=-10\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

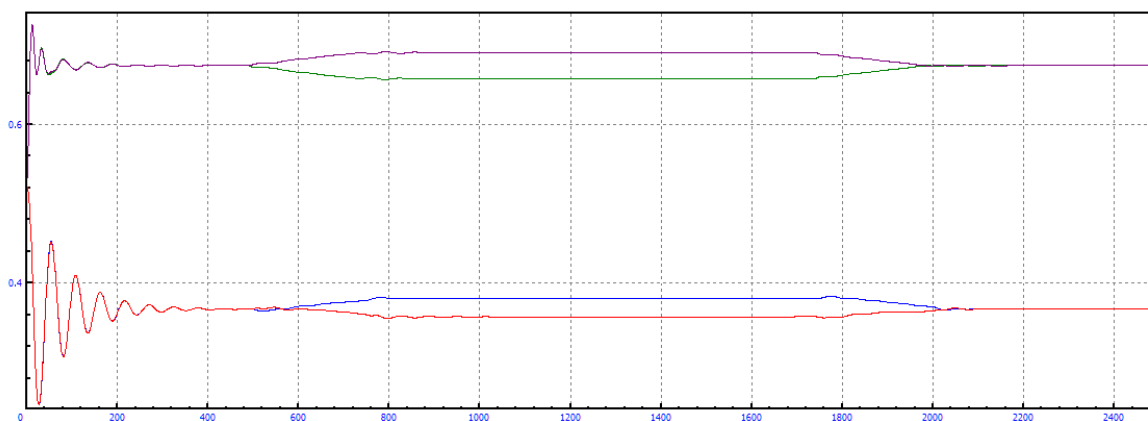


Figura A.763: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=-8\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

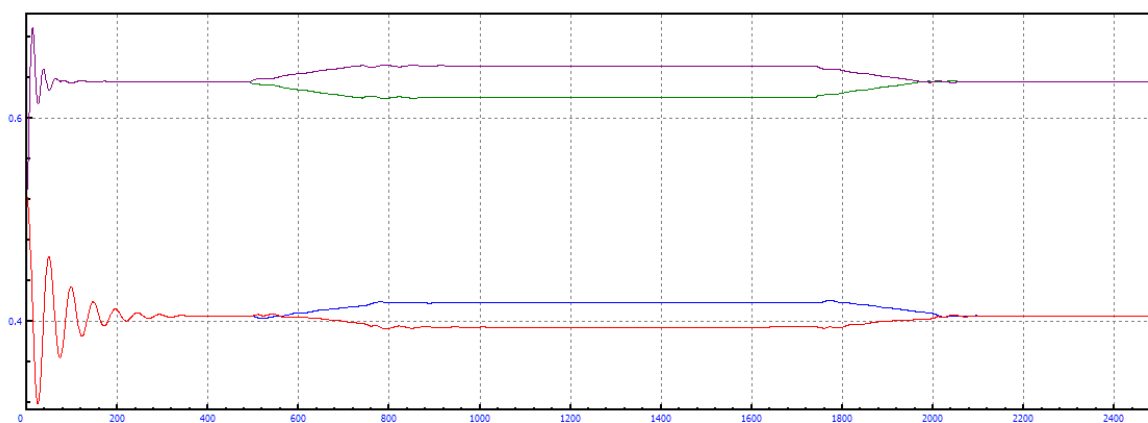


Figura A.764: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=-6\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

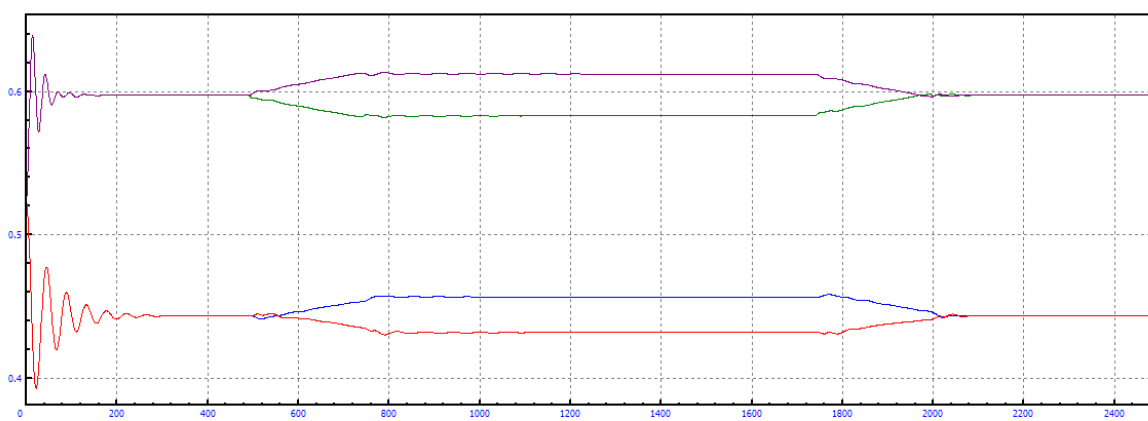


Figura A.765: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=-4\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

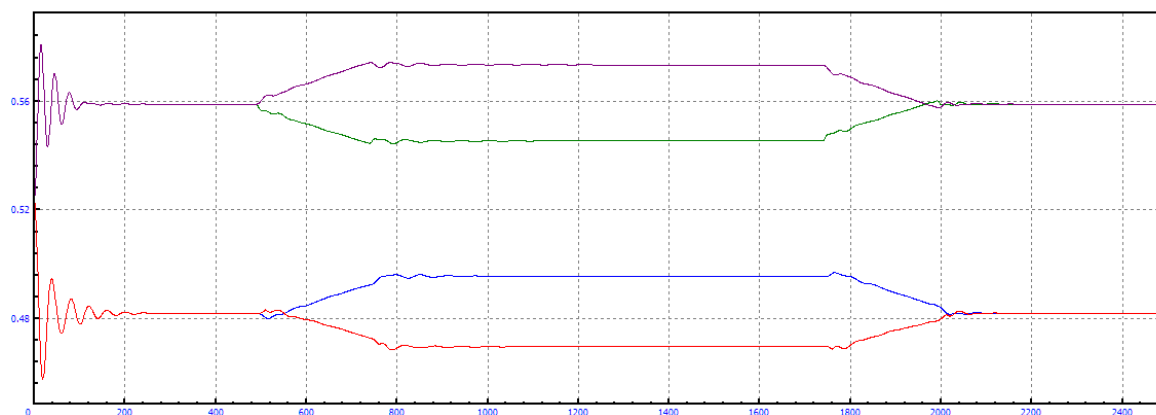


Figura A.766: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=-2\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

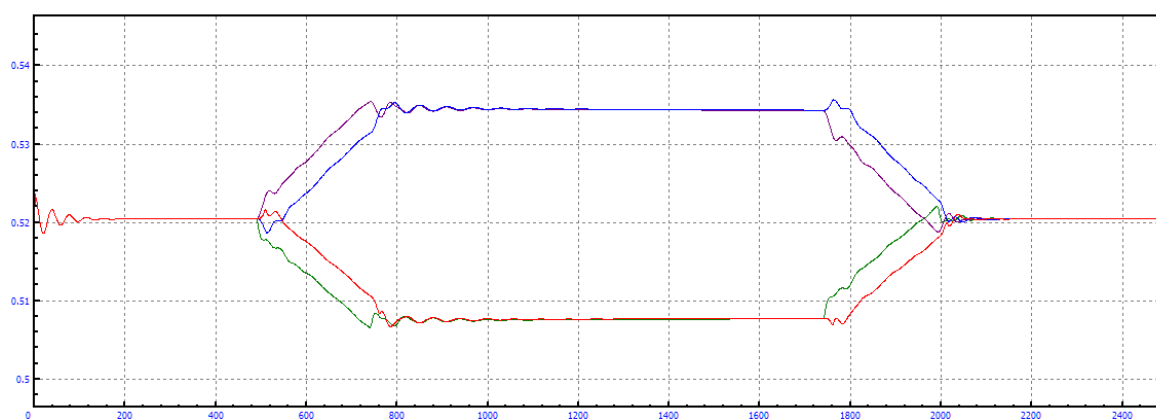


Figura A.767: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=0\text{m}$ (valor por defecto) y $V=40\text{m/s}$

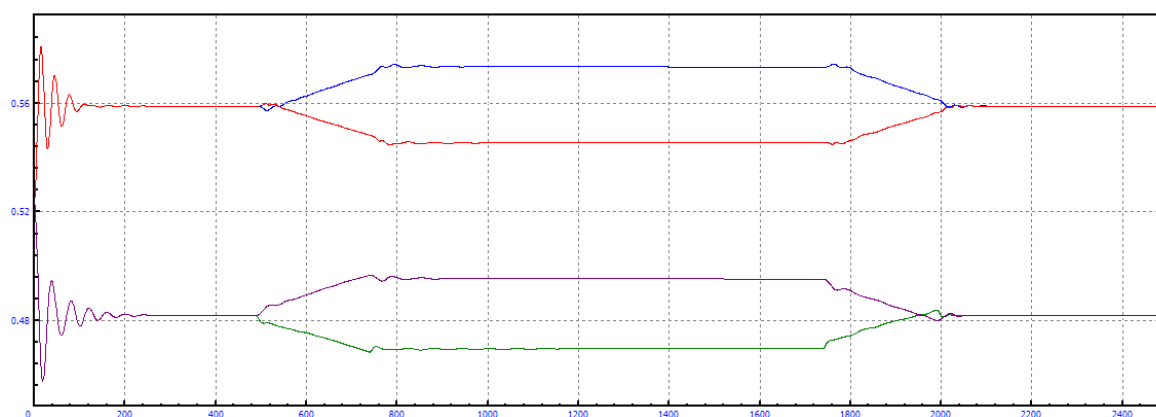


Figura A.768: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=+2\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

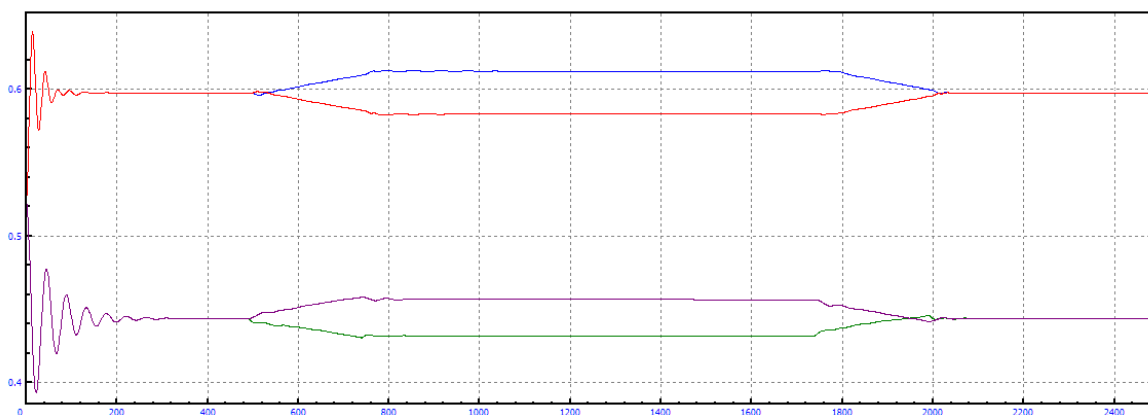


Figura A.769: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=+4\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

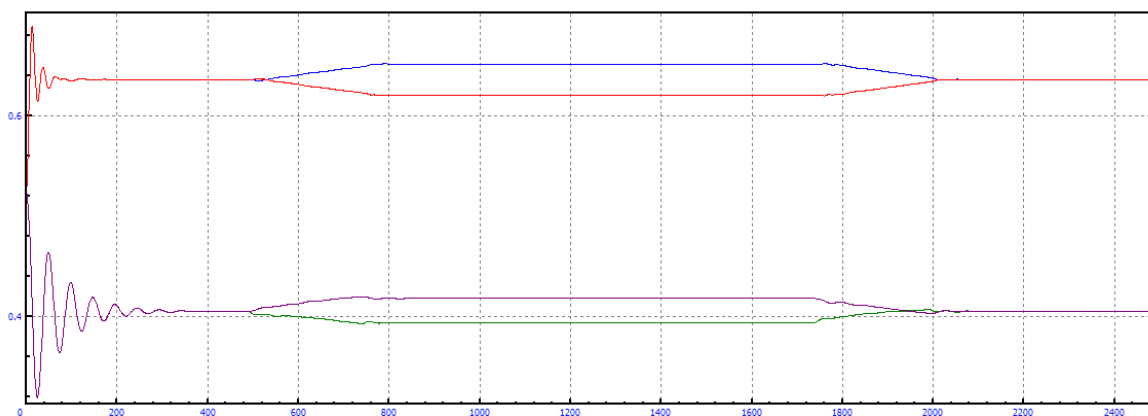


Figura A.770: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=+6\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

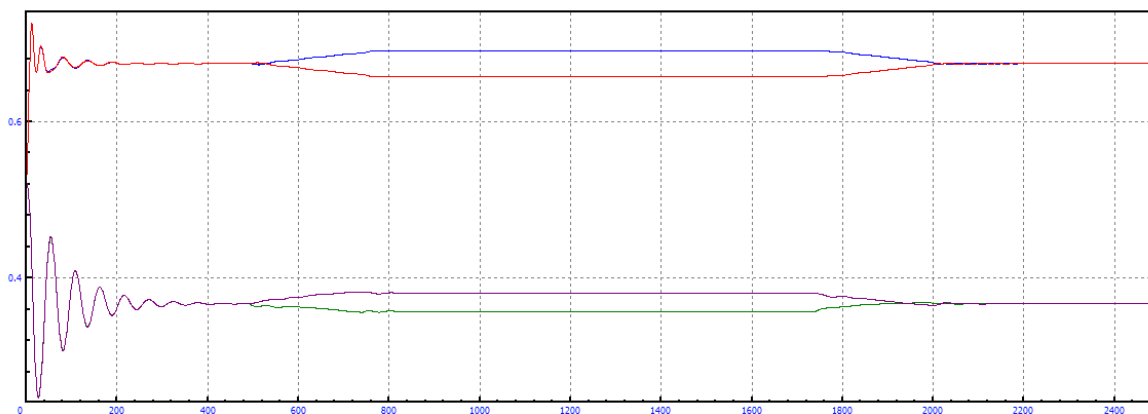


Figura A.771: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=+8\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

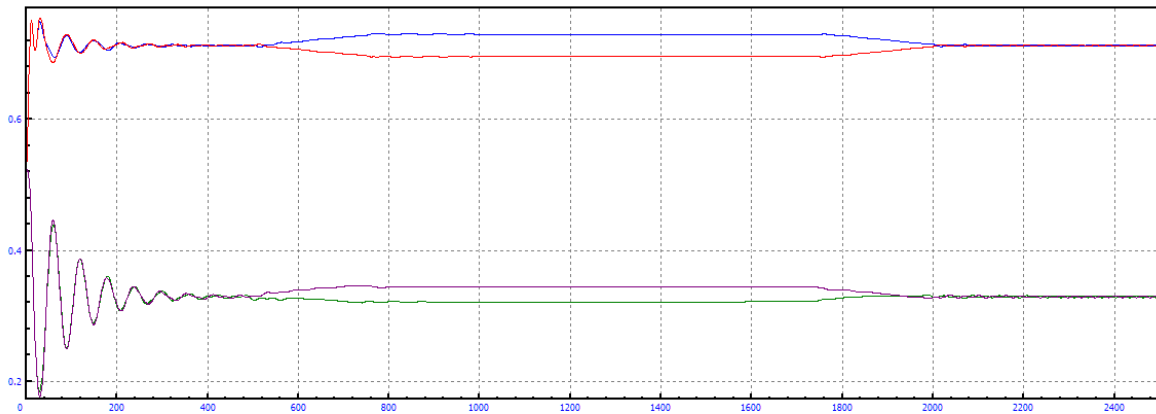


Figura A.772: Longitud amortiguadores en curva $R=1\text{km}$, centro de masas $X=+10\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

C.3.2 RADIO 2KM



Figura A.773: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=-10\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

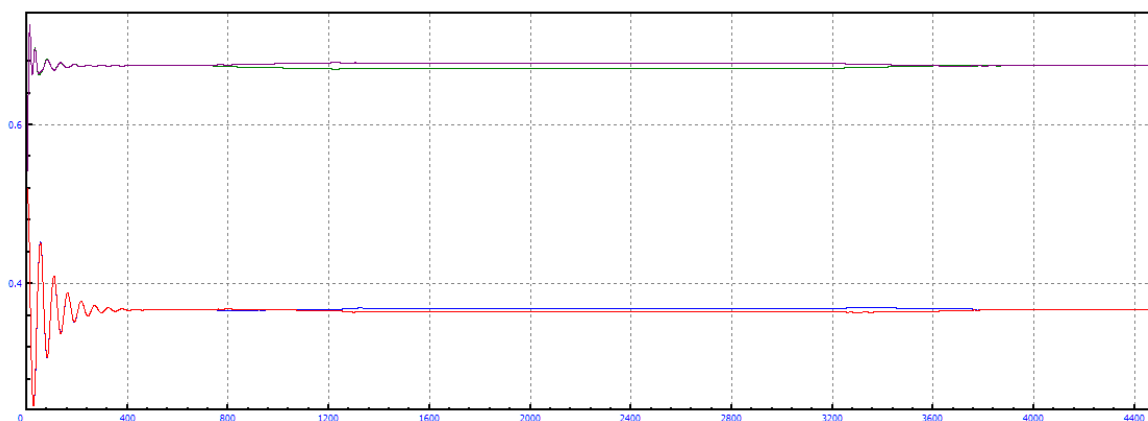


Figura A.774: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=-8\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

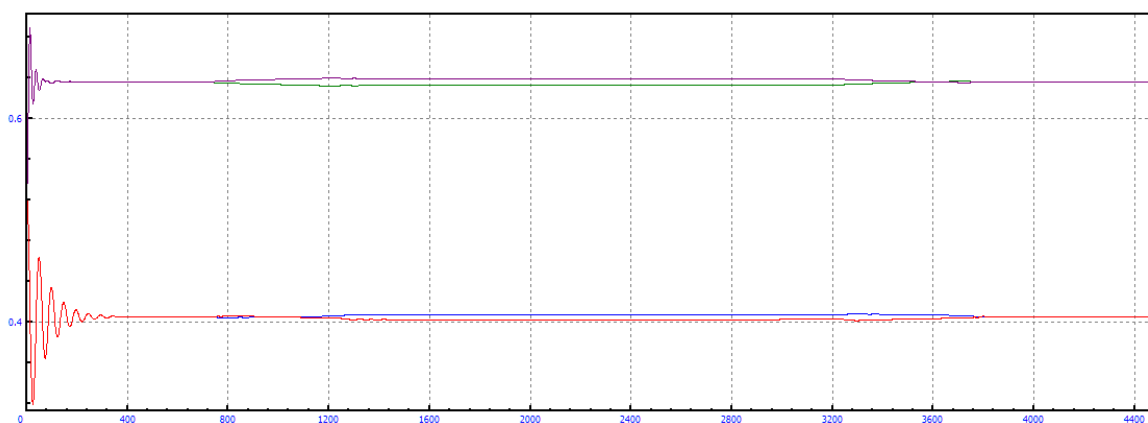


Figura A.775: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=-6\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

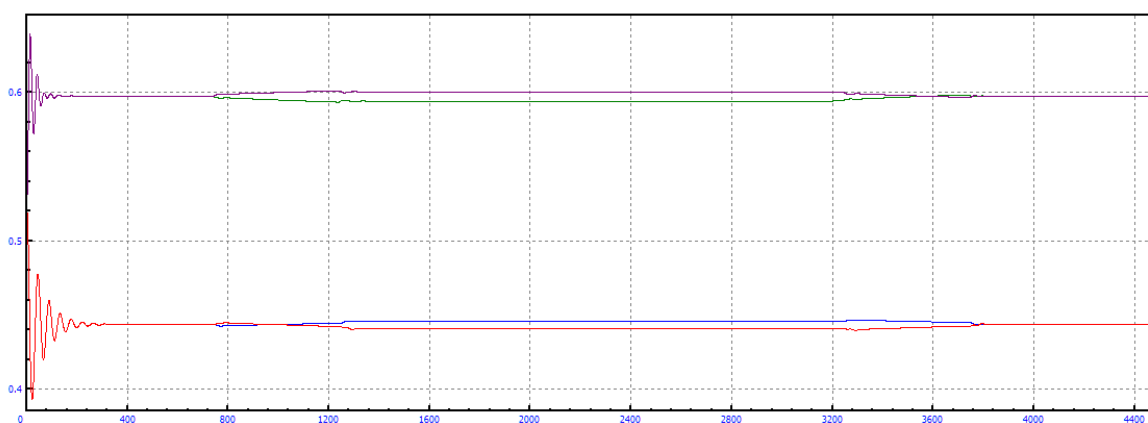


Figura A.776: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=-4\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

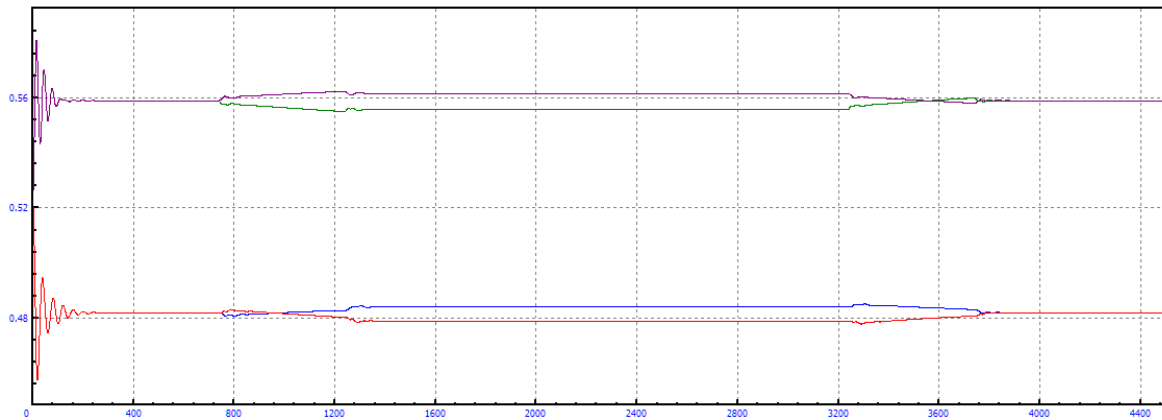


Figura A.777: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=-2\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

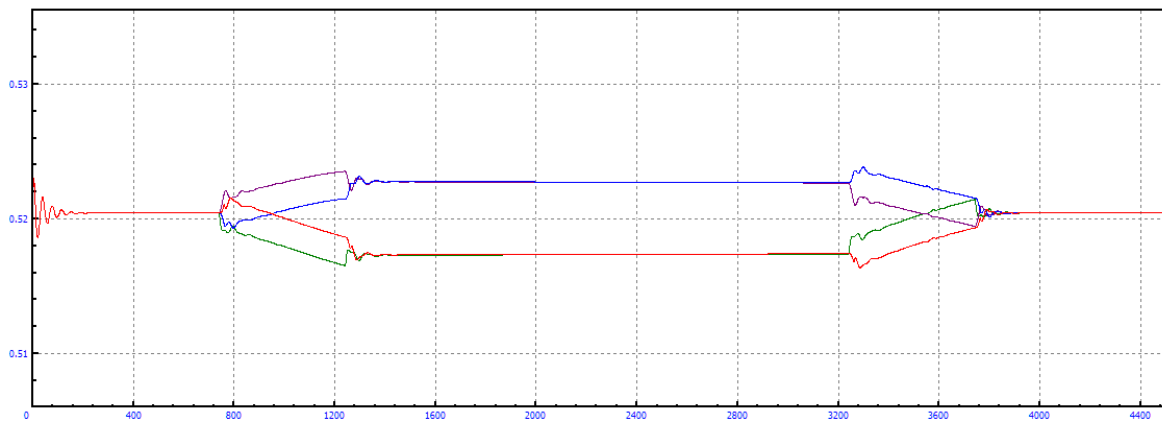


Figura A.778: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=0\text{m}$ (valor por defecto) y $V=40\text{m/s}$

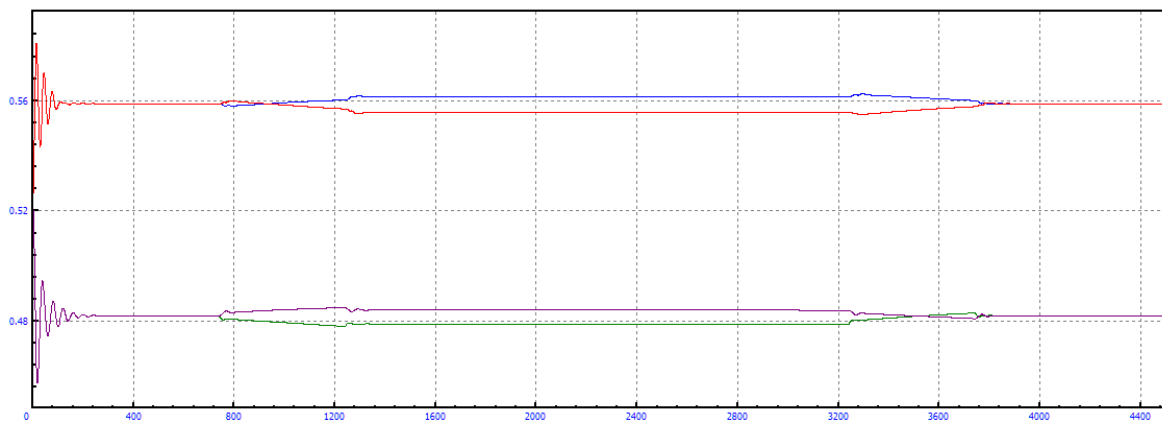


Figura A.779: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=+2\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

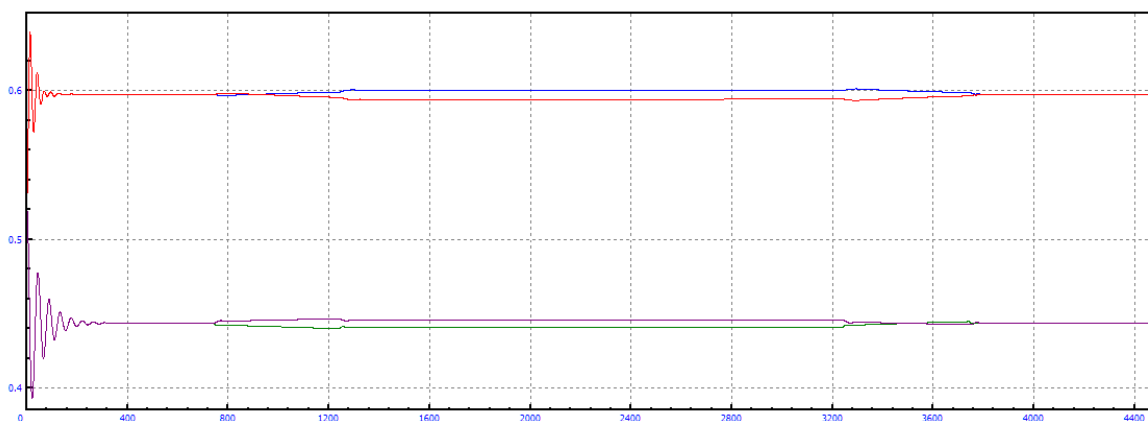


Figura A.780: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=+4\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

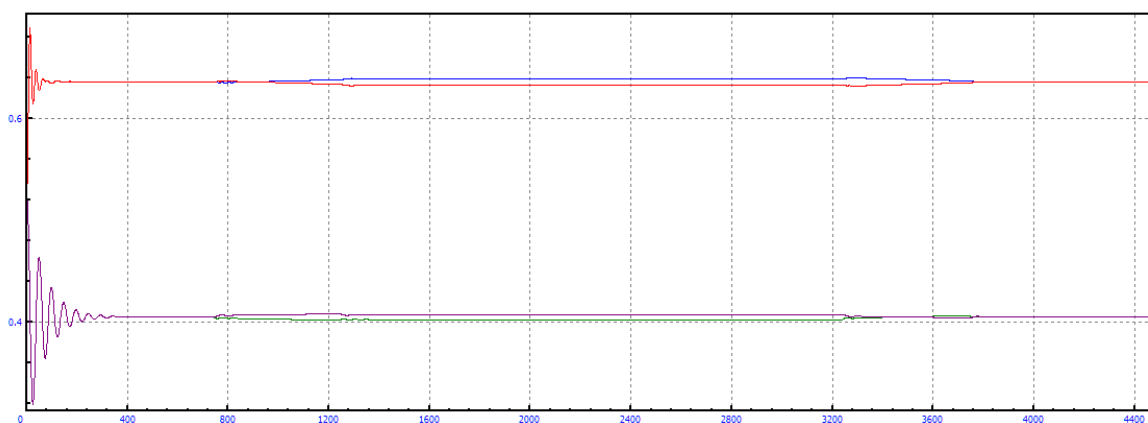


Figura A.781: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=+6\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

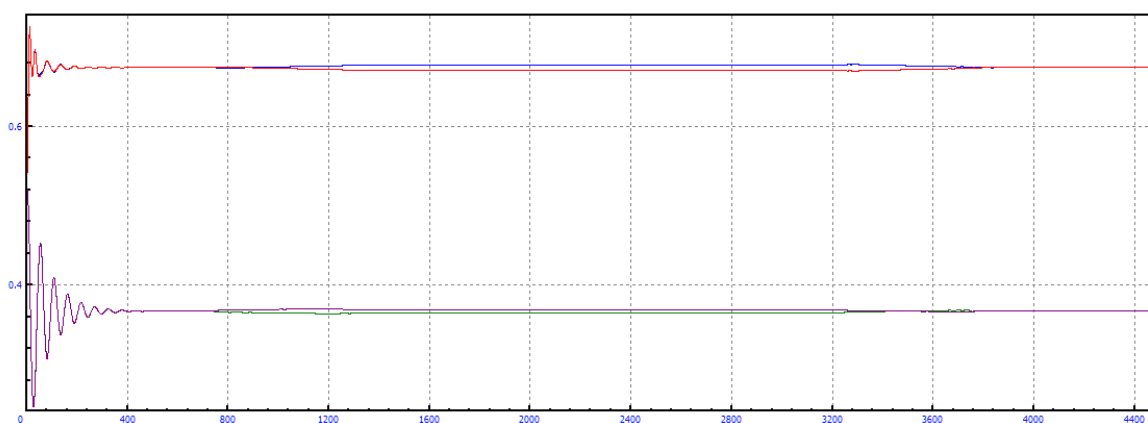


Figura A.782: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=+8\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$



Figura A.783: Longitud amortiguadores en curva $R=2\text{km}$, centro de masas $X=+10\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

C.3.3 RADIO 5KM

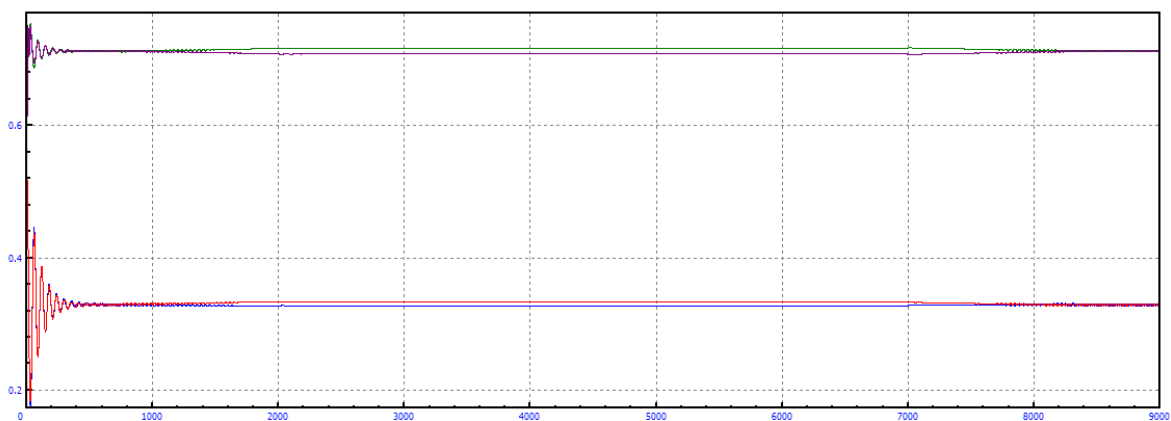


Figura A.784: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=-10\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

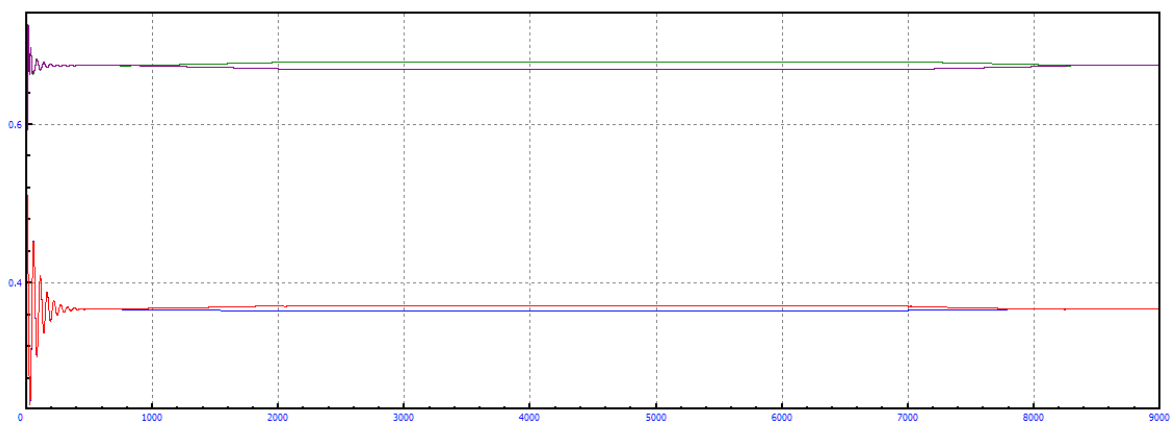


Figura A.785: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=-8\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

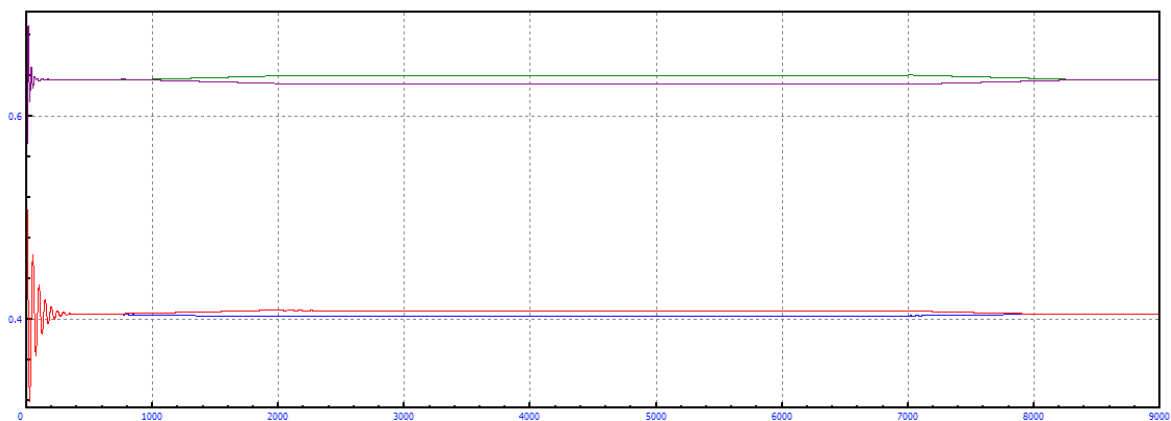


Figura A.786: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=-6\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

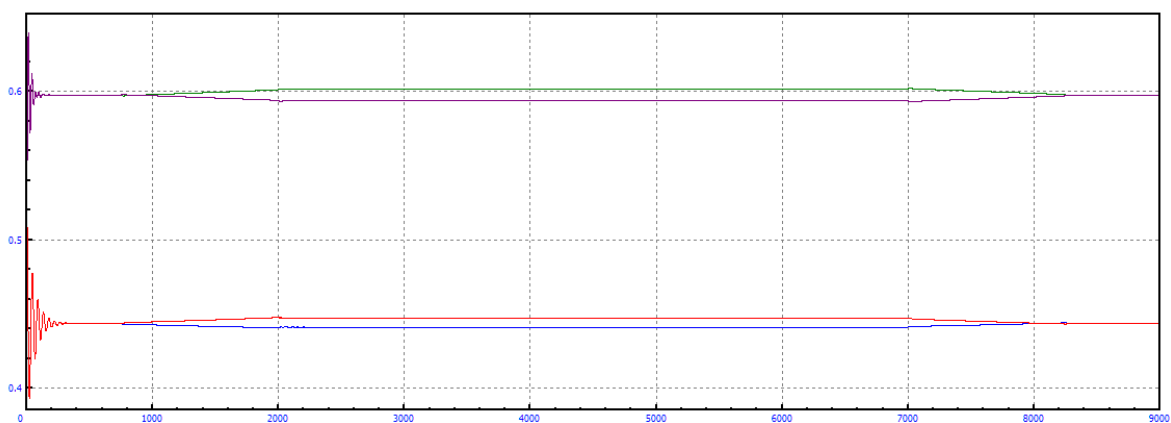


Figura A.787: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=-4\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

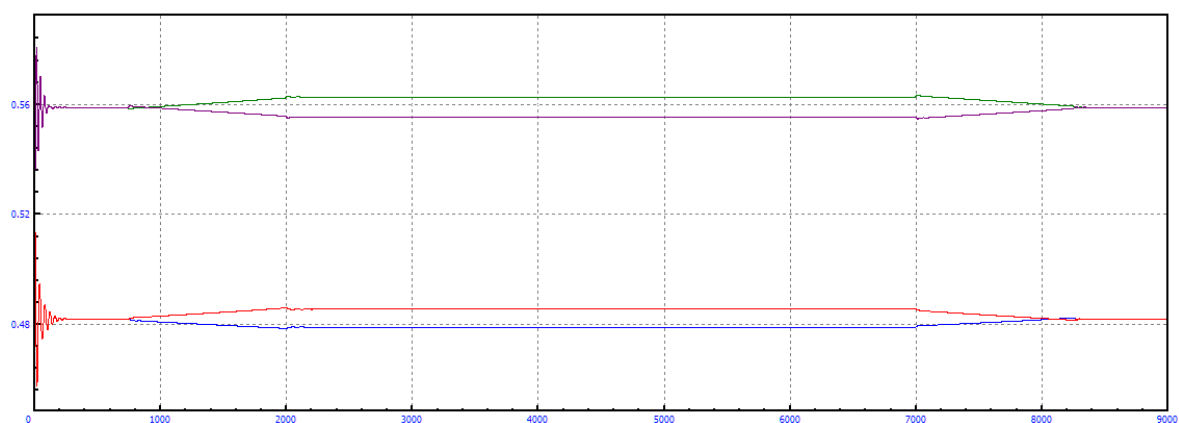


Figura A.788: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=-2\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

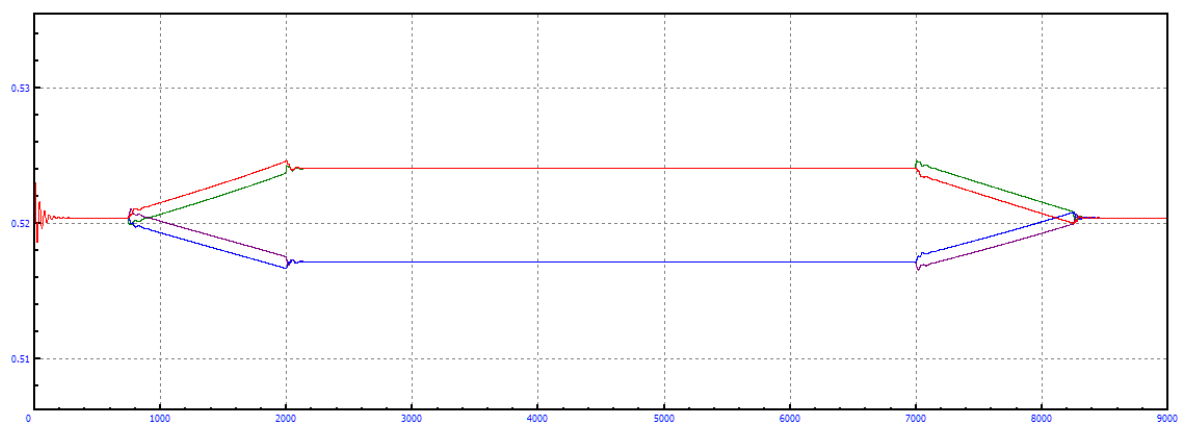


Figura A.789: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=0\text{m}$ (valor por defecto) y $V=40\text{m/s}$

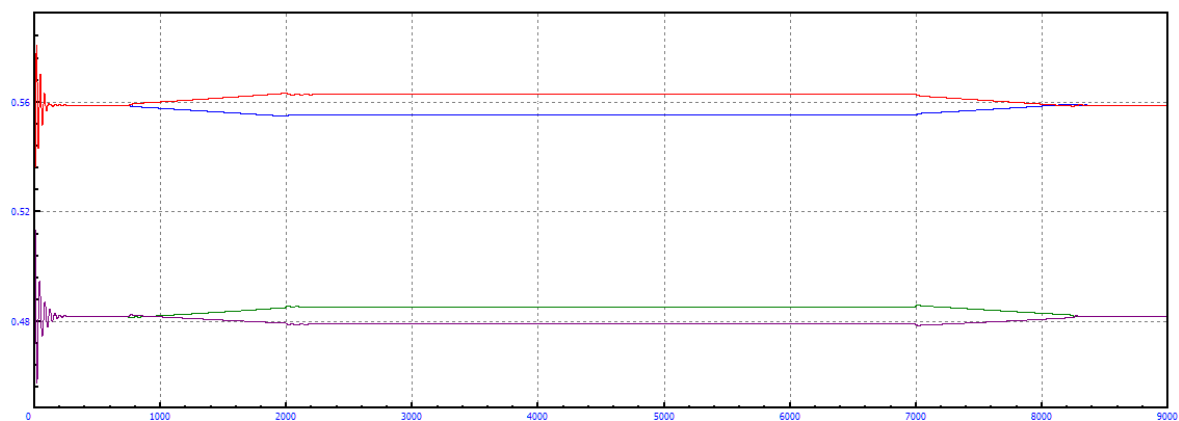


Figura A.790: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=+2\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

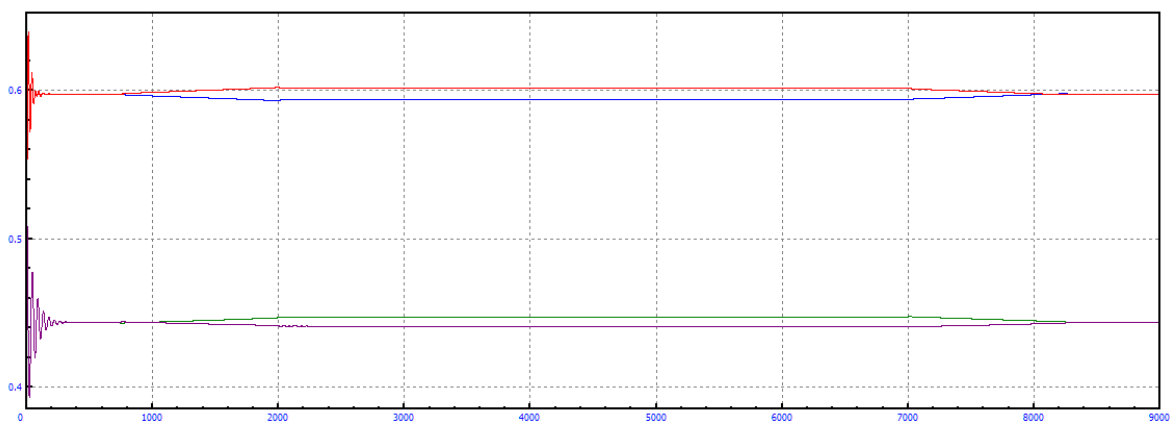


Figura A.791: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=+4\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

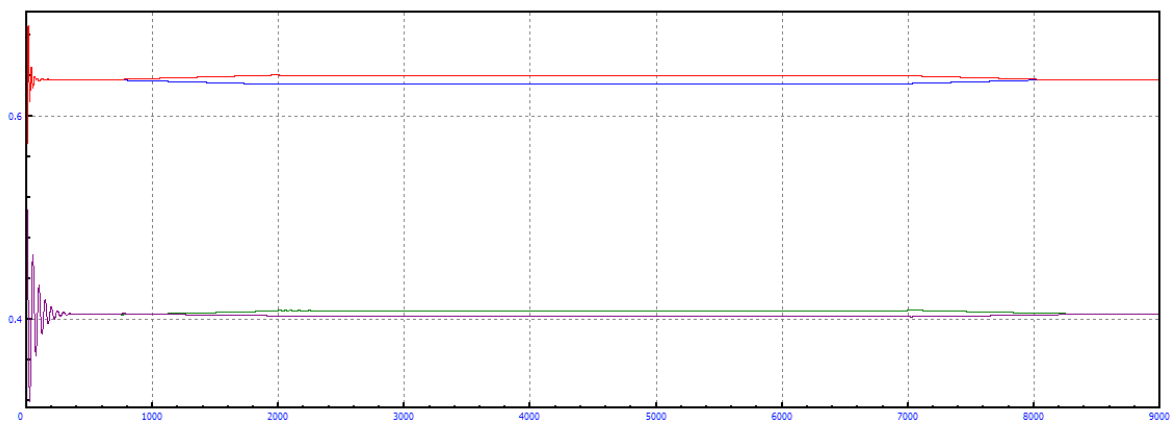


Figura A.792: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=+6\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

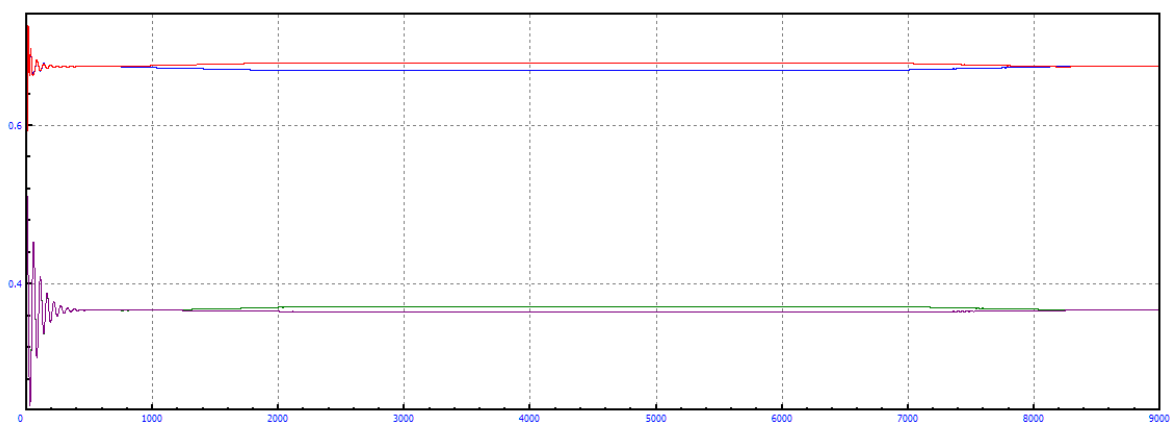


Figura A.793: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=+8\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$

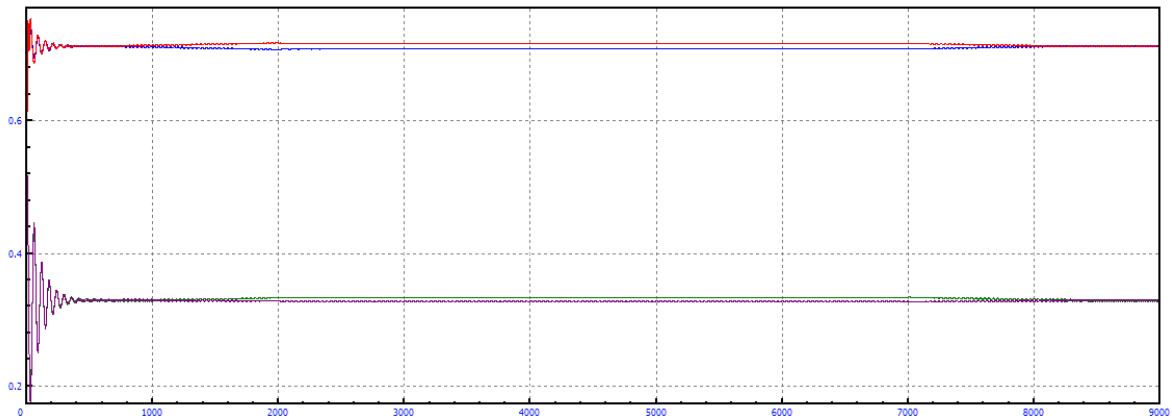


Figura A.794: Longitud amortiguadores en curva $R=5\text{km}$, centro de masas $X=+10\text{m}$ y $V=40\text{m/s}$